

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Analýza změny konstrukce sušícího nástavce s ohledem na
teplotní pole**

Analysis of the change construction the drying adapter on the temperature
field

Student:

Bc. Jan Dobeš

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Dobeš**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: Analýza změny konstrukce sušícího nástavce s ohledem na teplotní pole
Analysis of the Change Construction the Drying Adapter on the
Temperature Field

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše problematiky přenosu tepla (kondukce, konvekce).
2. Stanovení okrajových podmínek a definování 3D matematického modelu proudění s přestupem tepla.
3. Aplikace 3D matematického modelu na 3D proudění s přestupem tepla uvnitř stávající konstrukce sušícího nástavce.
4. Konstrukční úprava sušícího nástavce, aplikace matematického modelu na 3D proudění s přestupem tepla.
5. Vyhodnocení 3D proudění s přestupem tepla.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění- Fluent 1*, VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.
- [2] BOJKO, M. *Návody do cvičení „Modelování proudění“- FLUENT*, VŠB-TU Ostrava, 2008, 141 s. ISBN 978-80-248-1909-9.
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Bojko-Fluent.pdf>>
- [3] FLUENT *Fluent 6.3 - User's guide* Fluent Inc. 2006. VŠB-TU Ostrava
<http://spc.vsb.cz/portal/cz/documentation/manual/doc.vsb.c/Aplikacni%20software/Fluent_6.3.26/>.
- [4] JÍLEK, M. *Thermomechanics*, Nakladatelství ČVUT, 2006, 176 s. ISBN 80-01-03452-6.
- [5] NOŽIČKA, J. *Základy termomechaniky*, Nakladatelství ČVUT, 2001, 187 s. ISBN 80-01-02409-1.
- [6] ENENKL, V., HLOUŠEK, J., JANOTKOVÁ, E.. *Termomechanika*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1981, 289 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Jan Povýšil, Ph.D.

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 23.05.2011



Kozubková

prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry

Farana

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísěčné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..23.5.2011.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jan Dobeš

Novellara 19

Nový Jičín

V Ostravě : 23.5.2011


.....
podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a čas strávený konzultacemi při tvorbě této diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DOBEŠ, J. *Analýza změny konstrukce sušícího nástavce s ohledem na teplotní pole*. Ostrava: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 57 s. Diplomová práce, vedoucí BOJKO, M.

Diplomová práce se zabývá matematickým modelováním proudění skutečné tekutiny s přestupem tepla v konstrukci sušícího nástavce. Tento nástavec je používán k sušení wolframového vlákna po technologické operaci. V úvodní části diplomové práce je popsáno topné těleso sušícího nástavce a teorie sdílení tepla. Hlavním cílem diplomové práce je definování odpovídajícího matematického modelu proudění horkého vzduchu s přestupem tepla v aplikaci na sušící nástavec. V druhé fázi je definovaný matematický model aplikován na konstrukčně upravenou variantu sušícího nástavce s předpokládaným zlepšením přestupu tepla. K numerické simulaci byl využit CFD program ANSYS Fluent 13.0.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

DOBEŠ, J. *Analysis of the change construction the drying adapter on the temperature field*. Ostrava: Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2011, 58 p. Thesis, head: BOJKO, M.

This thesis deals with the mathematical modeling of real flow of fluids with heat transfer in the construction of the drying adapter. This adapter is used for drying the tungsten filament after the technological operation. In the introductory part of the thesis is described the drying heater and heat transfer theory. The main aim of the thesis is to define appropriate mathematical model of hot air flow with heat transfer and application on the drying adapter. In the second stage is a defined mathematical model applied on constructionally modified version of the drying adapter with an expected improvement in heat transfer. For the numerical simulation was used Fluent CFD 13.0.

SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ

| | | |
|-----------|------------------------------|----------------------|
| Q | množství tepla | [J] |
| R | elektrický odpor | [Ω] |
| I | elektrický proud | [A] |
| t | čas | [s] |
| Q_{m1} | hmotnostní průtok na vstupu | [kg/s] |
| Q_{m2} | hmotnostní průtok na výstupu | [kg/s] |
| Q_{N1} | objemový průtok na vstupu | [Nl/min] |
| Q_{N2} | objemový průtok na výstupu | [Nl/min] |
| p_0 | normální tlak | [Pa] |
| p_1 | přetlak | [Pa] |
| ρ | hustota | [kg/m ³] |
| ν | kinematická viskozita | [m ² /s] |
| T | teplota | [°K] |
| T_N | normální teplota | [°K] |
| λ | součinitel tepelné vodivosti | [W/m/K] |
| q | hustota tepelného toku | [W/m ²] |
| P | tepelný tok | [W] |
| α | součinitel přestupu tepla | [W/m ² K] |
| c_p | měrná tepelná kapacita | [kJ/kg/K] |
| Re | Reynoldsovo číslo | [-] |

| | | |
|---------------|---|----------------------|
| v | rychlost proudění | [m/s] |
| d | průměr potrubí | [mm] |
| u | složka rychlosti | [m/s] |
| S | povrch stěny | [m ²] |
| s | tloušťka stěny | [m] |
| h | entalpie | [J/kg] |
| E | energie | [J/kg] |
| ΔT | rozdíl teplot | [K] |
| Δn | rozdíl vzdáleností izotermických vrstev | [m] |
| $t_{1,2,3,4}$ | povrchové teploty | [K] |
| ρ_w | hustota material stěny | [kg/m ³] |
| h_w | entalpie stěny | [J/m ²] |
| l | výška válce | [m] |
| F_0 | hmotnostní síla | [N] |
| F_p | tlaková síla | [N] |
| F_t | třecí síla | [N] |
| F_s | setrvačná síla | [N] |

OBSAH

| | |
|--|----|
| Seznam použitého označení..... | 8 |
| 1. Úvod..... | 12 |
| 1.1 Konstrukce ohřívačů vzduchu a využití v průmyslové praxi..... | 13 |
| Příklady použití ohřívačů vzduchu | 14 |
| Sušení wolframového vlákna..... | 15 |
| 2. Měření průtoku vzduchu sušícím nástavcem na studeném modelu..... | 17 |
| 3. Přenos tepla..... | 20 |
| 3.1 Základní pojmy z oblasti sdílení tepla | 20 |
| Teplotní pole | 20 |
| Teplotní gradient..... | 20 |
| Tepelný tok | 21 |
| Hustota tepelného toku | 21 |
| 3.2 Kondukce | 21 |
| Stacionární vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou | 22 |
| Stacionární vedení tepla složenou rovinnou stěnou..... | 23 |
| Vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou | 24 |
| Vedení tepla složenou válcovou stěnou..... | 25 |
| 3.3 Konvekce | 25 |
| 4. Teorie proudění skutečné tekutiny s přenosem tepla..... | 28 |
| 4.1 Základní bilanční rovnice stacionárního proudění skutečné tekutiny | 29 |
| Rovnice kontinuity..... | 29 |
| Navier-Stokesova rovnice..... | 29 |
| 4.2 Proudění tekutiny s přenosem tepla | 31 |
| Přenos tepla v tekutině..... | 31 |
| Přenos tepla ve vodivé stěně..... | 31 |
| 5. Popis matematického modelování a tvorba výpočetní sítě..... | 32 |

| | |
|--|----|
| 5.1 Programový systém Fluent | 33 |
| 6. Definování matematického modelu sušícího nástavce, definování okrajových podmínek a tvorba výpočetní sítě | 34 |
| 6.1 Definování matematického modelu | 34 |
| Stanovení Reynoldsova čísla v geometrii sušícího nástavce | 35 |
| 6.2 Definování okrajových podmínek | 37 |
| Okrajové podmínky pro neizotermní proudění sušícím nástavcem..... | 37 |
| 6.3 Tvorba geometrie a výpočtové sítě | 39 |
| Charakteristika programového systému gambit | 40 |
| Výpočetní síť 3D modelu stávajícího a konstrukčně upraveného sušícího nástavce a okolní oblasti..... | 40 |
| 7. Aplikace matematického modelu ve 3d..... | 44 |
| 7.1 Studený model proudění vzduchu v sušícím nástavci | 44 |
| 7.2 Stávající konstrukce sušícího nástavce s přestupem tepla | 46 |
| 7.3 Změněná konstrukce sušícího nástavce s přestupem tepla | 48 |
| 7.4 Vyhodnocení matematického modelu na stávající a změněné konstrukci sušícího nástavce..... | 51 |
| 8. Závěr | 55 |
| 9. Literatura..... | 58 |
| 10. Přílohy..... | 59 |
| 10.1 Příloha ke kapitole 7.2 | 59 |
| 10.1 Příloha ke kapitole 7.3 | 60 |
| 10.2 Příloha ke kapitole 7.4 | 61 |

1. ÚVOD

Tato diplomové práce se zabývá modelováním proudění vzduchu s přestupem tepla v sušícím nástavci. Matematický model proudění vzduchu je aplikován na geometrii nástavce pro sušení wolframového vlákna. V úvodu práce je stručně popsána konstrukce ohřívačů vzduchu a jejich využití v průmyslové praxi.

Druhá kapitola popisuje experimentální měření průtoku na studeném modelu sušícího nástavce v prostorách laboratoře katedry. Výsledky experimentálního měření sloužili k porovnání s matematickým modelováním.

Ve třetí kapitole jsou popsány obecné principy přenosu tepla, tzn. kondukce, která je charakteristická především při sdílení v pevných tělesech a konvekce neboli proudění, jež je spojeno s tepelnými ději v tekutinách. Přenos tepla radiací v této diplomové práci není zmíněn, jelikož je pro vyšší rychlosti proudění zanedbán.

Základní rovnice pro proudění skutečné tekutiny jsou objasněny ve čtvrté kapitole. Jedná se o neizotermní proudění viskózní tekutiny, které je spojeno s řešením přenosu tepla v tekutině a pevné látce.

Ostatní kapitoly se věnují matematickému modelování proudění vzduchu v sušícím nástavci. V úvodní kapitole je popsán výpočetní software Fluent 13.0, který je součástí prostředí ANSYS. Tento program byl využit k simulaci proudění horkého vzduchu v sušícím nástavci. V prvním kroku byl na základě výkresové dokumentace vytvořen 3D model sušícího nástavce v grafickém programu SolidWorks. Model byl exportován do programu Gambit 2.4.6, ve kterém byla vytvořena výpočetní síť a nadefinovány typy okrajových podmínek. V posledním kroku byl definován odpovídající matematický model proudění vzduchu v sušícím nástavci (bez přestupu tepla jako studený model a s přestupem tepla jako reálný model).

Definovaný matematický model byl aplikován na tři varianty řešení. První a druhá varianta odpovídá stávající konstrukci sušícího nástavce (studený model – bez přestupu tepla; reálný model – s přestupem tepla). Pro předpokládaný lepší přenos tepla prouděním vzduchu byla navržena úprava, která spočívá ve změně průřezu přírodní trubky z kruhového tvaru na eliptický a vyosené napojení na vodorovnou trubku.

Pro novou geometrii byl definován stejný matematický model jako pro stávající konstrukci. V závěru práce jsou obě varianty konstrukce porovnány na základě vyhodnocených základních proudových veličin.

1.1 Konstrukce ohřivačů vzduchu a využití v průmyslové praxi

Elektrické ohřivače vzduchu jsou konstrukčně velmi jednoduchá zařízení, jejichž hlavním prvkem je odporové topné těleso. Odporový ohřev využívá přeměny elektrické energie na elektrické teplo při průchodu proudu odporovým členem. Elektrický příkon se přitom mění na tzv. Joulové teplo. Předávání tepla probíhá převážně konvekcí (prouděním ohřívaného vzduchu kolem topných těles) a částečně radiací.

Rovnice pro výpočet množství tepla je definován následujícím vztahem:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [\text{J}] \quad (1.1)$$

kde

R ... odpor topného tělesa [Ω]

I ... elektrický proud přivedený do topného tělesa [A]

t ... čas [s]

Materiál topných rezistorů ohřivače vzduchu musí mít následující vlastnosti:

- velká rezistivita
- malý teplotní součinitel odporu
- vysoký bod tání
- odolnost proti oxidaci atd.

Příklady použitých materiálů ohřivače vzduchu v závislosti na teplotě jsou uvedeny v tabulce 1.1.

| Teplota [°C] | Materiál |
|--------------|--|
| do 350 | - slitiny Cu-Ni (nikelin, konstantan) |
| do 800 | - chrómová litina s 2 % až 7 % Cr - křemíková litina s 5 % Si - slitina Fe-Cr-Ni (cekas, ferrochronin) |
| do 1350 | - slitina Fe-Cr-Mn - Fe-Cr-Al (kanthal, chromal) - Fe-Cr-Co |
| nad 1350 | - kovy: Pt, Mo, W - nekovy: suit, kryptol, globar, tuha |

Tab.1.1 Příklady materiálů pro výrobu topných těles ohříváčů vzduchu

Na obr.1.1 jsou příklady topných těles používaných v průmyslové praxi, které se liší tvarem a velikostí teplosměnné plochy.



Obr.1.1 Příklady tvarů topných těles

Příklady použití ohříváčů vzduchu

- vysoušení a ohřívání
- smršťování a svařování balících fólií (obr.1.2)
- aktivace a uvolňování tavných lepidel
- ohřev průběžných pecí
- zapalování paliv a jejich spalování bez kouře
- odhrotování plastů po lisování
- oddělování a tavení syntetických vláken a tkanin
- sterilizace obalových prostředků
- značení
- odmrazování atd.



Obr.1.2 Příklady použití ohřívачů vzduchu: smršťování zátek lahví a svařování PVC trubek

1.2 Použití ohřívачe vzduchu k sušení wolframového vlákna

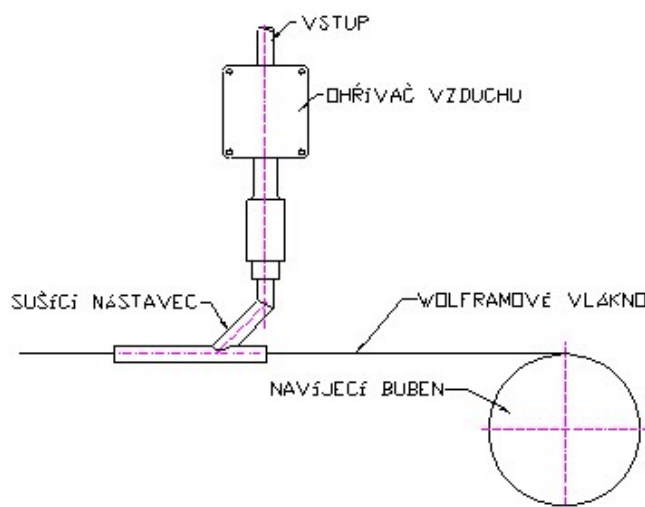
Jednou z aplikací použití ohřívачe vzduchu je využití v procesu sušení wolframového drátu. Vlastním zdrojem záření u moderních svítidel je vlákno, které je výhradně vyráběno z tenkého wolframového drátu o průměru 10 μm až 120 μm . Této tloušťky se dosahuje tažením a leptáním wolframového drátu. Po leptání se vlákno oplachuje a následně suší, aby v reakci se vzduchem nezoxidovalo. Dále se spiralizuje většinou do dvojité šroubovice navíjením na molybdenový trn, který má dvakrát až pětkrát větší průměr, než je průměr vlákna. Pnutí, které vzniká při navíjení vlákna, se odstraní žiháním ve vodíkové atmosféře při teplotách 1 000 až 1 500 $^{\circ}\text{C}$. Po rozřezání vláken na potřebné délky se molybdenový trn chemicky rozpustí ve vroucím roztoku kyseliny sírové a dusičné. Molybden je v roztoku rozpustný, ale wolfram odolává.

Sušení wolframového vlákna

Sušení wolframového vlákna je realizováno pomocí sušícího nástavce, který je napojen na ohřívач vzduchu jak je patrné z obr.1.3 Do ohřívачe vstupuje vzduch o objemovém průtoku Q_{N1} a je ohříván na teplotu T . Horký vzduch pak proudí nástavcem, kterým prochází wolframový drát. Celý proces je znázorněn schematicky na obr.1.4.



*Obr.1.3 Stávající nástavec
s ohřivačem vzduchu*

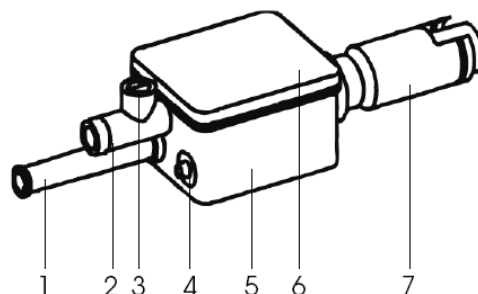


*Obr.1.4 Schematické znázornění procesu
sušení wolframového drátu*

Ohřivač vzduchu LEISTER LE 700

Pro proces sušení wolframového vlákna je použit kompaktní ohřivač LEISTER LE 700 (obr. 1.5). Tento malý ohřivač je vhodný pro provoz s dmychadlem nebo pro napojení na centrální rozvod stlačeného vzduchu. Pro případ přehřátí je opatřen řídicí elektronikou, která automaticky sníží výkon. [6]

| | |
|----|---|
| 1. | Vložka pro napojení elektrického kabelu |
| 2. | Přípojka tlakového vzduchu |
| 3. | Šroub regulující průtok vzduchu |
| 4. | Potenciometr pro nastavení teploty |
| 5. | Tělo přístroje |
| 6. | Kryt |
| 7. | Výstup horkého vzduchu |



Obr. 1.5 LEISTER LE 700

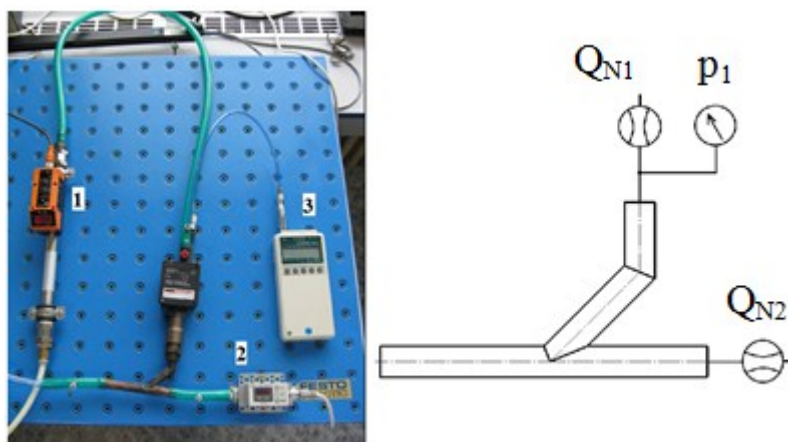
| | |
|----------------------------------|-----------|
| Napětí [V] | 220-230 |
| Frekvence [Hz] | 50/60 |
| Výkon[W] | 700 |
| Minimální průtok vzduchu [l/min] | 80 |
| Maximální teplota[°C] | 600 |
| Okolní teplota[°C] | <60 |
| Váha[kg] | 0,26 |
| Rozměry (LxBxH)[mm] | 191x63x46 |

Tab.1.2 Parametry přístroje LEISTER LE 700

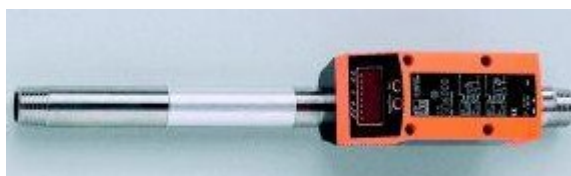
2. MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU SUŠÍCÍM NÁSTAVCEM NA STUDENÉM MODELU

Cílem měření bylo získat hodnoty hmotnostního průtoku Q_{N2} (obr. 2.1) pro porovnání s matematickým modelem. Měření bylo uskutečněno v laboratoři, kde se nástavec spolu s ohřivačem napojily na centrální rozvod vzduchu a pomocí kulového ventilu byly nastavovány různé hodnoty průtoku.

Obrázek 2.1 zobrazuje průběh měření, kdy byl na vstupu zapojen průtokoměr SD 6000 (obr. 2.2) který zobrazoval průtok Q_{N1} . Na výstupu byl současně zapojen průtokoměr PF2A750 (obr. 2.3) zobrazující hodnotu Q_{N2} . Obě měřidla vyhodnocují průtok v normálních litrech za minutu (Nl/min). Pro další výpočty bylo nutné hodnoty přepočíst na hmotnostní průtok s ohledem na následnou definici do matematického modelování. Pro zjištění vstupního relativního tlaku byl na vstup připojen digitální tlakoměr zobrazující hodnotu tlaku p_1 .



Obr. 2.1 Měření průtoku Q_{N2}



| | |
|-------------------------|------------------|
| Typ | SD6000 |
| Médium | suchý vzduch |
| Rozsah měřeného průtoku | 4 až 1250 Nl/min |
| Rozsah provozního tlak | 0 až 0,16 MPa |

Obr.2.2 Průtokoměr SMC PF2A750 použitý pro měření Q_{N1}



| | |
|-------------------------|---------------------|
| Typ | PF2A750 |
| Médium | suchý vzduch, dusík |
| Rozsah měřeného průtoku | 5 až 50 Nl/min |
| Rozsah provozního tlak | 0 až 0,5 MPa |
| Tlaková ztráta | 3 kPa (50 Nl/min) |

Obr.2.3 Průtokoměr SMC PF2A750 použitý pro měření Q_{N2}

Výsledky naměřených hodnot jsou uvedené v tab. 2.1

| Číslo měření | Teplota [°C] | Q_{N1} [Nl/min] | Q_{N2} [Nl/min] | p_1 [Pa] | Q_{m1} [kg/s] | Q_{m2} [kg/s] |
|--------------|--------------|-------------------|-------------------|------------|-----------------|-----------------|
| 1. | 20 | 32 | 5,5 | 925 | 0,000648 | 0,000111 |
| 2. | 20 | 40 | 6,5 | 1250 | 0,000807 | 0,000131 |
| 3. | 20 | 50 | 8 | 1705 | 0,001005 | 0,000161 |
| 4. | 20 | 60 | 9,5 | 2280 | 0,001199 | 0,000190 |
| 5. | 20 | 70 | 11,5 | 2915 | 0,001390 | 0,000228 |
| 6. | 20 | 80 | 13 | 3610 | 0,001578 | 0,000256 |
| 7. | 20 | 90 | 14,5 | 4436 | 0,001762 | 0,000284 |
| 8. | 20 | 100 | 16,5 | 5380 | 0,001940 | 0,000320 |
| 9. | 20 | 110 | 18,5 | 6550 | 0,002111 | 0,000355 |

Tab.2.1 Naměřené hodnoty

Přepočet objemového průtoku na hmotnostní průtok:

Hmotnostní průtok je definován vztahem:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \quad [\text{kg/s}] \quad (2.1)$$

$$\text{kde } Q_{v1,2} = Q_{N1,2} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_0}{p} \quad [l/min] \quad (2.2)$$

Q_N ... objemový průtok [Nl/min]

T_N ... tzv. normální teplota 288 [°K]

p_0 ... normální tlak 101 325 [Pa]

$$p = p_0 + p_1 \quad [Pa] \quad (2.3)$$

p_1 ... přetlak změřený na vstupu do nástavce [Pa]

ρ ... hustota vzduchu při teplotě 20°C 1,205 [kg/m³]

T ... teplota okolního vzduchu 293 [°K]

Příklad výpočtu pro měření č.4

Objemový průtok:

$$Q_{V1} = Q_{N1} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_0}{p} \quad [l/min]$$

$$Q_{V1} = 60 \cdot \frac{293}{288} \cdot \frac{101325}{103605} = 59,698 \quad [l/min]$$

Hmotnostní průtok:

$$Q_{m1} = Q_{V1} \cdot \rho \quad [kg/s]$$

$$Q_{m1} = \frac{59,698 \cdot 1,205}{60000} = 0,001197 \quad [kg/s]$$

3. PŘENOS TEPLA

Přenos tepla je děj, v němž vyšetřujeme zákony přechodu tepelné energie z prostředí teplejší látky do chladnější. Soustava s vyšší teplotou odevzdává část své tepelné energie soustavě s nižší teplotou, dokud není dosaženo rovnovážného stavu. Rozlišujeme tři základní způsoby přenosu tepla:

- kondukcí (vedením)
- konvekcí (prouděním)
- radiací (sáláním)

V praxi se uvedené přenosy jen výjimečně objevují samostatně. Většinou se jedná o kombinaci dvou nebo všech tří způsobů společně. Pro zjednodušení můžeme složený přenos rozdělit na jednotlivé typy a celkovou energii dostaneme jejich součtem.

3.1 Základní pojmy z oblasti sdílení tepla

Teplotní pole

Přísluší-li každému bodu prostoru v určitý okamžik určitá teplota, tvoří tento prostor teplotní pole. Je-li teplota funkcí času, je pole nestacionární. Nemění-li se teplota s časem jedná se o pole stacionární. Rozlišujeme jedno-, dvou- a třírozměrné pole. [2]

Teplotní gradient

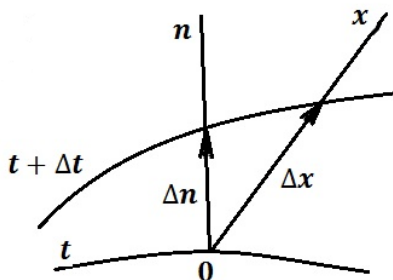
Geometrická místa bodů stejné teploty tvoří izometrické plochy. Každý bod prostoru má jedinou hodnotu teploty a proto se nemohou izometrické plochy protínat. Teplotní gradient je vektorová veličina, která udává změnu teploty ve směru normály k izometrickému povrchu.[2]

$$\text{grad } T = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.1)$$

kde

ΔT ... rozdíl relativních či absolutních teplot mezi zkoumanými izotermickými plochami

Δn ... rozdíl vzdáleností izotermických vrstev ve směru normály k těmto vrstvám (plochám).



obr.3.1 Teplotní gradient

Tepelný tok

Představuje množství tepelné energie přenesené za jednotku času a je definován vztahem [2]:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau} \quad [J/s] \quad (3.2)$$

Hustota tepelného toku

Hustota tepelného toku vyjadřuje podíl tepelného toku procházející v daném okamžiku zvolenou elementární plochou, kolmou ke směru průchodu tepla a plošného obsahu této plochy. [2]

$$q = \frac{d\dot{Q}}{dS} \quad [J/m^2/s] \quad (3.3)$$

3.2 Kondukce

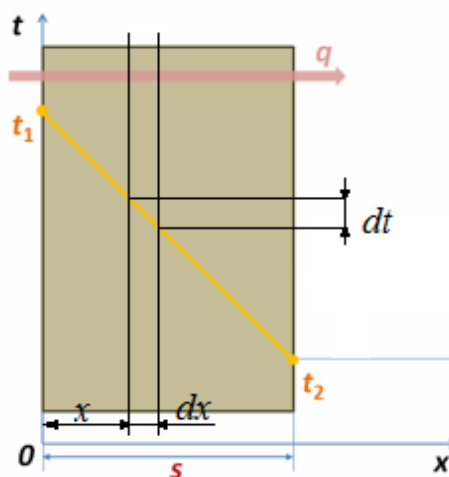
Základní zákon vedení tepla ustanovil francouzský vědec Joseph Fourier, který při vyšetřování průtoku tepla tuhým tělesem zjistil, že množství tepla proteklého tělesem je přímo úměrné teplotnímu spádu, času a průtočné ploše, kolmé na směr proudění tepla. Proto množství tepla, proteklého jednotkou plochy za jednotku času je:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad [W/m^2] \quad (3.4)$$

kde λ [W/mK] je součinitel tepelné vodivosti, který závisí na teplotě a materiálu. Nejvyšší hodnoty λ mají kovy, především kovy čisté s přesnou krystalickou strukturou. Hůře vedou teplo nekovové materiály zvláště pak amorfnní látky, nejhůře vedou teplo plyny. Toho se s výhodou využívá u izolačních materiálů.

Stacionární vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou

Rovinná stěna o tloušťce s má dva povrchy o teplotách t_1 a t_2 . Izotermické plochy jsou rovnoběžné a ve vzdálenosti x od počátku dojde v elementární vrstvě dx k poklesu teploty o dt (viz.obr.3.2). [3]



Obr.3.2 Stacionární vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou

Hustota tepelného toku je odvozena s prvního Fourierova zákona:

$$q = \frac{\lambda}{s} \cdot (t_1 - t_2) \quad [W/m^2] \quad (3.5)$$

Průběh teploty ve stěně je vyjádřen vztahem:

$$t = t_1 - \frac{x \cdot (t_1 - t_2)}{s} \quad (3.6)$$

Stacionární vedení tepla složenou rovinnou stěnou

Pro rovinnou stěnu, složenou s jednotlivých vrstev z různých materiálů, kdy se stěny dokonale dotýkají, platí stejné vyjádření pro hustotu tepelného toku jako pro každou stěnu samostatně (viz. obr.3.3). Platí tedy:

$$q = \frac{\lambda_1}{s_1} (t_1 - t_2) \quad [W/m^2] \quad (3.7)$$

$$q = \frac{\lambda_2}{s_2} (t_2 - t_3) \quad [W/m^2] \quad (3.8)$$

$$q = \frac{\lambda_3}{s_3} (t_3 - t_4) \quad [W/m^2] \quad (3.9)$$

kde

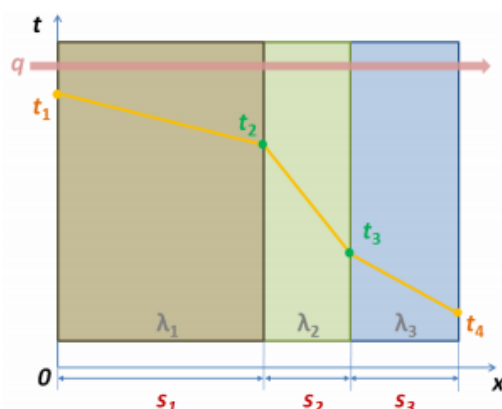
$\lambda_{1,2,3,\dots}$ součinitel tepelné vodivosti pro jednotlivé stěny

$s_{1,2,3,\dots}$ je tloušťka stěny

$t_{1,2,3,4,\dots}$ je teplota na povrchu stěny

součtem tepelných toků q procházející přes jednotlivé stěny dostaneme:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}} \quad [W/m^2] \quad (3.10)$$



Obr.3.3 Stacionární vedení tepla složenou rovinnou stěnou [7]

Vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou

Izotermické plochy mají tvar soustředných válců o poloměrech r_1 a r_2 . Vnitřní povrch má teplotu t_1 a vnější t_2 . Hustota tepelného toku q se mění s poloměrem válce r a tato závislost je označena jako tepelný tok P .

Tepelný tok je definován následující rovnicí:

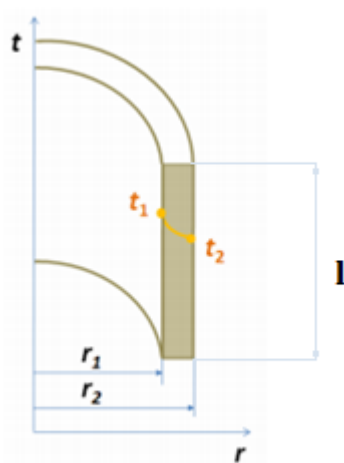
$$P = \frac{\pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{l}{2\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [W] \quad (3.11)$$

kde

$l \dots$ je výška válce

$t_{1,2} \dots$ teplota povrchu

$r_{1,2} \dots$ poloměr válce



Obr.3.4 Vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou [7]

Průběh teploty ve stěně je vyjádřen vztahem:

$$t = t_1 - (t_1 - t_2) \cdot \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [^{\circ}C] \quad (3.12)$$

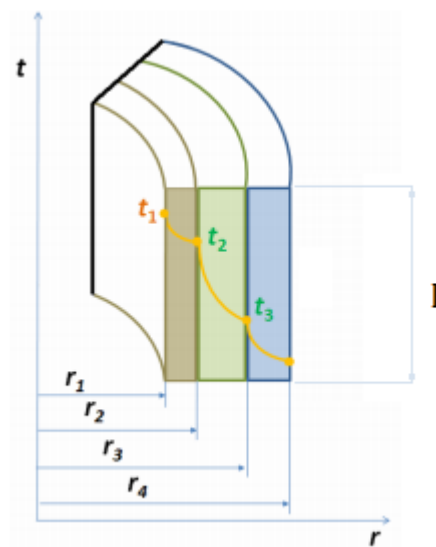
Lineární hustota tepelného toku je dána vztahem:

$$q_l = \frac{P}{l} = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{l}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [W/m] \quad (3.13)$$

Vedení tepla složenou válcovou stěnou

Obdobně jako pro jednoduchou válcovou stěnu platí vztah pro určení lineárního tepelného toku stěny složenou ze tří resp. s n – vrstev:

$$q_l = \frac{P}{l} = \frac{\pi(t_1 - t_4)}{\frac{l}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{l}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{l}{2\lambda_3} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}} = \frac{\pi(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad [W/m] \quad (3.14)$$



Obr.3.5 Vedení tepla složenou válcovou stěnou [7]

3.3 Konvekce

Konvekce zahrnuje pochody výměny tepla mezi kapalinou a tuhým tělesem při jejich přímém styku. Při konvekci dochází k průtoku tepla tekutinou a současně k proudění tekutiny samotné. Tekutina ulpívající na stěnách, v těsné blízkosti má stejnou teplotu, v mezní vrstvě je minimální nebo nulová rychlost a od určité vzdálenosti se jak teplotní, tak rychlostní pole mění. [3]

Tepelný tok lze vyjádřit tzv. Newtonovým vztahem:

- pro tepelný tok se stěny obr.3.6 platí následující vztah:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (t_s - t) [W] \quad (3.15)$$

- pro tepelný tok na stěnu obr.3.7 platí následující vztah:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (t - t_s) [W] \quad (3.16)$$

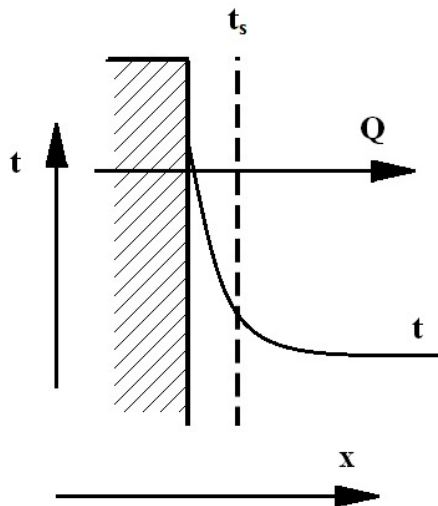
kde

$\alpha \dots$ [W/m²K] je součinitel přestupu tepla, který vyjadřuje množství tepla, předané za jednotkový čas mezi tekutinou a jednotkovou plochou povrchu stěny [7]

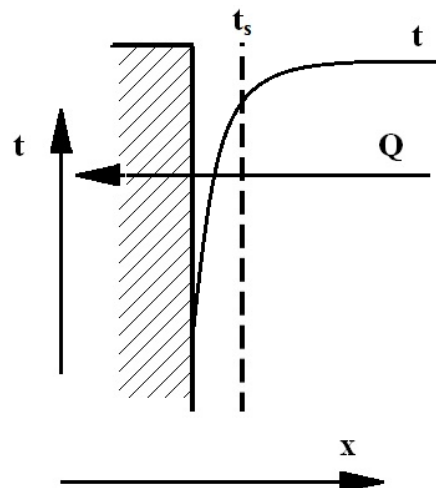
$S \dots$ velikost povrchu stěny

$t_s \dots$ teplota stěny

$t \dots$ teplota okolí



Obr.3.6 Tepelný tok se stěny



Obr.3.7 Tepelný tok na stěnu

Rozlišujeme dva způsoby vzniku proudění tekutiny:

- přirozená konvekce
- nucená konvekce

Přirozená konvekce vzniká vlivem rozdílu měrných vah ohřátých a studených částic tekutiny. Vznik a intenzita tohoto volného pohybu závisí na tepelných podmínkách pochodu, rozdílu teplot a rozsahu prostoru, v němž děj probíhá.

Nucenou konvekci nazýváme proudění, které vzniká působením vnějších účinků, například urychlení čerpadlem, ventilátorem atd.. Podmínky tohoto pohybu závisí na druhu a fyzikálních vlastnostech tekutiny. [7]

Přestup tepla mezi pevnou stěnou a tekutinou je charakterizován základními diferenciálními rovnicemi hydrodynamiky (4.1), (4.3) a sdílení tepla v pohybujícím se prostředí (4.4), (4.5).

Podmínky jednoznačnosti

Pro zkoumaný případ je nutné k soustavě diferenciálních rovnic připojit podmínky jednoznačnosti, které případ konkretizují.

- Geometrické podmínky – charakterizují tvar a rozměry tělesa, v němž děj probíhá
- Fyzikální podmínky – charakterizuje fyzikální vlastnosti prostředí
- Okrajové podmínky – charakterizují rysy na povrchu soustavy, např. rozdělení rychlosti a teploty na vstupu do soustavy, teplota stěn atd.
- Časové podmínky – charakterizují průběh pochodu v závislosti na čase

Teorie podobnosti

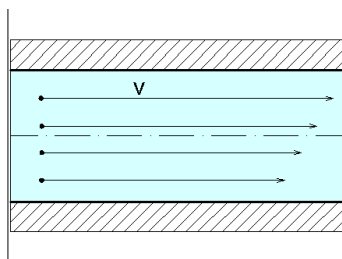
Jelikož podmínky jednoznačnosti neodpovídají skutečnosti, byla zavedena teorie podobnosti.[8]

- Fourierovo číslo – charakterizuje podmínky nestacionárního sdílení tepla
- Pecletovo číslo – charakterizuje poměr konvekčních a kondukčních tepelných toků

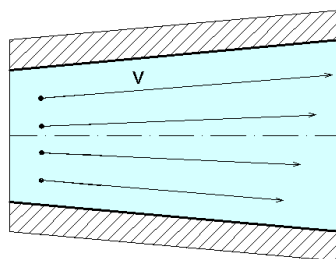
- Nusseltovo číslo – charakterizuje intenzitu tepelného toku mezní vrstvou
- Reynoldsovo číslo – charakterizuje poměr setrvačných sil a sil molekulárního tření
- Prandtlovo číslo – charakterizuje fyzikální vlastnosti tekutiny, u ideálních plynů závisí pouze na počtu atomů v molekule
- Grashofovo číslo – charakterizuje poměr vztlakových sil a sil molekulárního tření

4. TEORIE PROUDĚNÍ SKUTEČNÉ TEKUTINY S PŘENOSEM TEPLA

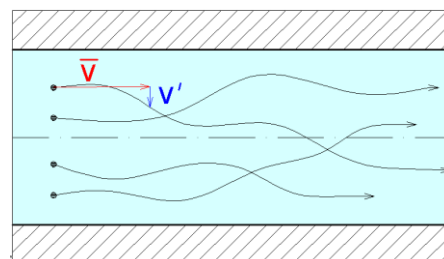
Skutečná tekutina může proudit buď laminárně, nebo turbulentně. Laminární proudění je charakterizováno pohybem částic v tenkých vrstvách bez přemísťování po průřezu, viz obr.4.1. U turbulentního proudění mají částice kromě podélné rychlosti také turbulentní rychlost, kterou se přemísťují po průřezu, viz obr. 4.2.



Obr. 4.1 Laminární proudění [2]



obr. 4.2 Turbulentní proudění [2]



Podle uspořádání v prostoru můžeme proudění dělit na:

- jednorozměrné proudění – počítané veličiny závisí na poloze na křivce (proudění v potrubních systémech), $v = v(s)$
- dvourozměrné proudění – veličiny, jako je například rychlost, závisí na poloze v rovině (osově symetrické proudění v rovině), $v = v(x, y)$
- třírozměrné proudění – veličiny, například rychlost závisí na poloze v prostoru, $v = v(x, y, z)$

Podle závislosti na čase dělíme proudění na:

- proudění ustálené (stacionární), které není závislé na čase $v \neq v(t)$; $\frac{\partial}{\partial t} = 0$
- proudění neustálené (nestacionární), u něhož jsou veličiny závislé na čase
 $v = v(x, y, z, t)$; $v = v(s, t)$; $v = v(t)$ [2]

4.1 Základní bilanční rovnice stacionárního proudění skutečné tekutiny

Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity vyjadřuje obecný fyzikální zákon o zachování hmotnosti. Pro turbulentní stlačitelné neizotermní proudění má tvar:

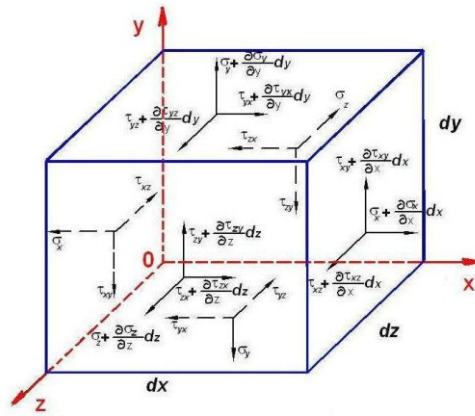
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

Navier-Stokesova rovnice

Rovnováha sil při proudění skutečné tekutiny je vyjádřena Navierovými-Stokesovými rovnicemi. Kromě sil vnějších, tlakových a setrvačných spojených s vlastním pohybem částic tekutiny, přistupují u skutečné tekutiny třecí síly, které jsou způsobeny viskozitou tekutiny. [1]

Rovnováhu sil při proudění skutečné tekutiny dostaneme, když sečteme hmotnostní, tlakovou a třecí sílu a tento součet položíme rovno setrvačné síle:

$$F_s = F_o + F_p + F_t \quad (4.2)$$



Obr.4.3 Napětí na elementárním objemu tekutiny

Stanoví-li se rovnováha všech sil působících na elementární objem, dostaneme Navier-Stokesovu rovnici.

$$\frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + f_i, \quad i=1, \dots, n \quad (4.3)$$

kde

i ... index vyjadřující složku vektoru

j ... sčítací index

u ... složka rychlosti

p ... tlak

ρ ... hustota

ν ... kinematická viskozita

f ... složka vnější objemové síly (gravitační, odstředivé) [2]

4.2 Proudění tekutiny s přenosem tepla

Při neizotermním proudění se obvykle setkáváme s výměnou tepla mezi dvěma tekutinami, které jsou vzájemně odděleny pevnou stěnou různého tvaru. Teplo nejdříve přestoupí na stěnu, projde stěnou a přestoupí do prostředí chladnějšího. Řešíme tedy přenos tepla v tekutině a přenos tepla ve vodivé stěně.

Přenos tepla v tekutině

Při neizotermním proudění skutečné tekutiny dochází k přenosu tepelné energie kondukcí i konvekcí současně. Tento děj popisuje rovnice energie, která má pro turbulentní proudění všech veličin tvar:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j E) = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \bar{u}_j f_j + \frac{\partial(\tau_{jl} \bar{u}_j)}{\partial x_l} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4.4)$$

kde

$E = U + \frac{1}{2} \bar{u}_j^2$ celková energie, která je součtem vnitřní a kinetické energie

$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$

$\lambda \dots$ součinitel molekulové teplotní vodivosti,

$\lambda_t \dots$ součinitel turbulentní tepelné vodivosti

$\bar{h} = U + \frac{\bar{p}}{\rho}$ entalpie

Přenos tepla ve vodivé stěně

Přenos tepla je definován obdobnými veličinami jako v tekutinách. Neuvažuje se fluktuace teploty, neboť v pevných látkách nemají smysl. [2]

Rovnice entalpie je:

$$\frac{\partial}{\partial X_j}(\bar{u} \cdot \rho h_w) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\lambda_w \frac{\partial T}{\partial X_j} \right) \quad (4.5)$$

kde

ρ_w ... hustota materiálu stěny

h_w ... entalpie stěny, $c_w(T - T_{ref})$

λ_w ... tepelná vodivost materiálu stěny

T ... teplota stěny

5. POPIS MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ A TVORBA VÝPOČETNÍ SÍTĚ

Matematický model, je abstraktní model, který využívá matematického jazyka k popisu chování systému. Matematické modelování slouží především k simulování procesů, které jsou buď ekonomicky náročné, jevy nezvratné nebo jevy, které je nutno sledovat v dlouhodobém časovém intervalu. Modelování má smysl pouze tehdy, jeli dostatečně známý modelovaný jev, hranice oblasti, okrajové a materiálové podmínky.

Pomocí numerického modelování se dají řešit různé fyzikální modely proudící tekutiny jako například:

laminární a turbulentní proudění

- stlačitelné a nestlačitelné proudění
- stacionární a nestacionární proudění
- přenos tepla
- přenos chemické příměsi včetně chemických reakcí
- vícefázové proudění, atd.

Výše uvedené děje jsou popsány soustavou parciálních diferenciálních rovnic, které se řeší numerickými metodami. Parciální diferenciální rovnice lze řešit pomocí:

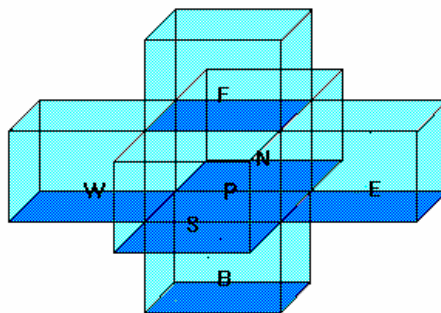
- Diferenční metody
- Metody konečných prvků
- Metody konečných objemů
- Spektrální metody

5.1 Programový systém Fluent

Fluent využívá metody konečných objemů, která je založena na třech základních bodech:

- dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace
- numerické řešení diskretizovaných rovnic v obecném tvaru

Fluent definuje diskrétní konečné objemy užitím non-staggered schematu, kdy všechny proměnné jsou uchovávány ve středech konečných objemů.[2]



Obr. 5.1 Souřadnicové schéma se značením buněk pro 3D model, N – sever, S – jih, E – východ, W – západ, F – vpřed, B – vzad [2]

diskretizovaná rovnice v obecném tvaru:

$$\xi_P \sum_i (A_i - S_P) = \sum_i A_i \xi_{i+} S_C \quad (5.1)$$

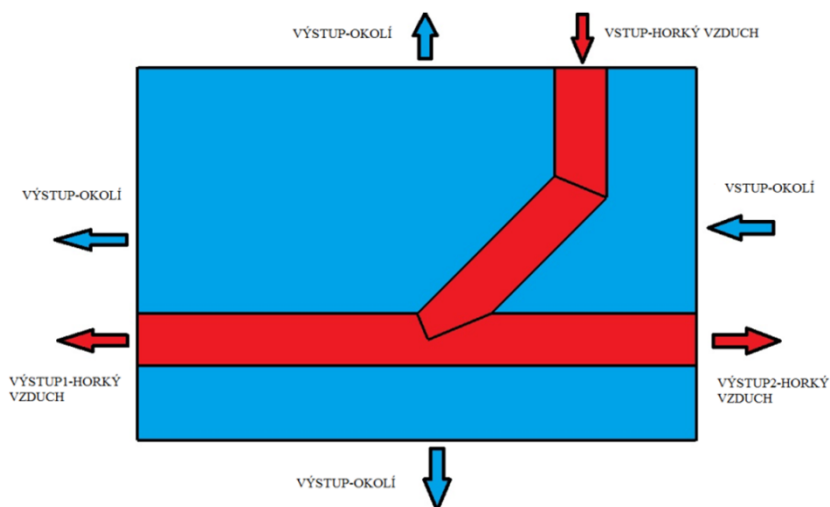
kde součet se provede přes sousední buňky (v trojrozměrném případě $i = N, S, E, W, F, B$). A_i jsou koeficienty, které obsahují příspěvky od konvektivních, difúzních a zdrojových členů a S_C , S_p jsou složky linearizovaných zdrojových členů. [2]

6. DEFINOVÁNÍ MATEMATICKÉHO MODELU SUŠÍCIHO NÁSTAVCE, DEFINOVÁNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A TVORBA VÝPOČETNÍ SÍTĚ

6.1 Definování matematického modelu

Na základě charakteristiky problematiky proudění horkého vzduchu v sušícím nástavci byl definován odpovídající matematický model, který bude nastíněn níže. Na obr. 6.1 je patrný model sušícího nástavce včetně okolního prostředí v řezu.

Ve stávající geometrii sušícího nástavce bylo provedeno devět variant nastavení vstupních parametrů pro simulaci, které se lišily velikostí objemového průtoku a teplotou. Pro všechny varianty vychází Reynoldsovo číslo vyšší než je kritická hodnota $Re_{krit} = 2320$ pro potrubí kruhového průřezu. Na základě tohoto kritéria byl definován turbulentní k- ϵ standardní model proudění. Při proudění horkého vzduchu nástavcem bude docházet k přestupu tepla do stěny trubky a dále pak do okolního prostředí. S ohledem na tuto skutečnost bylo definováno neizotermní proudění.



Obr. 6.1 Model sušícího nástavce s okolím v řezu

Vypočtené vstupní parametry k numerické simulaci jsou uvedené v tab. 6.1.

| Varianta | Teplota [°C] | Objemový průtok Q_{N1} [Nl/min] | Q_{m1} [kg/s] | v [m/s] | Re [-] |
|----------|-----------------|--------------------------------------|--------------------|--------------|----------|
| 1 | 300 | 60 | 0,001217 | 12,839 | 3784,14 |
| 2 | 300 | 80 | 0,001623 | 17,119 | 5045,52 |
| 3 | 300 | 100 | 0,002029 | 21,398 | 6306,9 |
| 4 | 400 | 60 | 0,001216 | 15,080 | 3405,097 |
| 5 | 400 | 80 | 0,001622 | 20,106 | 4540,13 |
| 6 | 400 | 100 | 0,002027 | 25,133 | 5675,162 |
| 7 | 500 | 60 | 0,001225 | 17,320 | 3120,791 |
| 8 | 500 | 80 | 0,001634 | 23,094 | 4161,054 |
| 9 | 500 | 100 | 0,002042 | 28,867 | 5201,318 |

Tab.6.1 Varianty nastavení

Stanovení Reynoldsova čísla v geometrii sušícího nástavce

Příklad výpočtu Reynoldsova čísla pro nejnižší vstupní rychlost:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (6.1)$$

$$Re = \frac{12,83 \cdot 0,014}{4,75 \cdot 10^{-5}} = 3784,14 \quad [-]$$

kde

v ... rychlost proudění

d ... charakteristický rozměr

ν ... kinematická viskozita

Proudění horkého vzduchu v nástavci je definováno jako:

- turbulentní
- trojrozměrné
- neizotermní – je uvažován přestup tepla
- stlačitelné – ideální plyn
- stacionární

Příklad přepočtu objemového průtoku na hmotnostní pro variantu 1

Hmotnostní průtok je definován vztahem:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \quad [kg/s] \quad (6.2)$$

$$\text{kde } Q_{v1} = Q_{N1} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_N}{p} \quad [l/min] \quad (6.3)$$

Q_{N1} ... objemový průtok [Nl/min]

T_N ... tzv. normální teplota 288 [°K]

p_N ... normální tlak 101 325 [Pa]

p ... přetlak 102 000 [Pa]

T ... teplota okolního vzduchu 573 [°K]

ρ ... hustota vzduchu při teplotě 300°C 0,616 [kg/m³]

Příklad výpočtu pro variantu 1

Objemový průtok:

$$Q_{V1} = Q_{N1} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_n}{p} \quad [l/min]$$

$$Q_{V1} = 60 \cdot \frac{573}{288} \cdot \frac{101325}{102000} = 118,585 \quad [l/min]$$

Hmotnostní průtok:

$$Q_{m1} = Q_{V1} \cdot \rho \quad [kg/s]$$

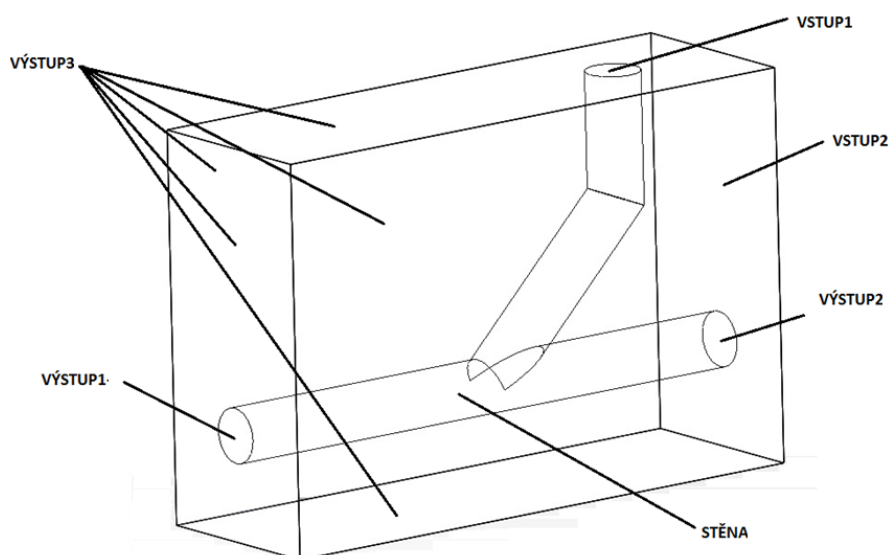
$$Q_{m1} = \frac{118,585 \cdot 0,616}{60000} = 0,001217 \quad [kg/s]$$

6.2 Definování okrajových podmínek

Okrajové podmínky pro neizotermní proudění sušícím nástavcem

Okrajové podmínky na vstupech a výstupech

Pro řešení matematického modelu sušícího nástavce byla na průtočných hranicích obou vstupů (vstup do nástavce a vstup do okolního prostředí) použita okrajová podmínka „Mass Flow Inlet“, pro definici hmotnostního průtoku. Na výstupu z nástavce i z okolí byla použita podmínka pro definování velikosti tlaku „Pressure Outlet“, viz obr. 6.1, obr. 6.2. Konkrétní typy okrajových podmínek na jednotlivých hranicích jsou uvedeny v tabulce 6.2.



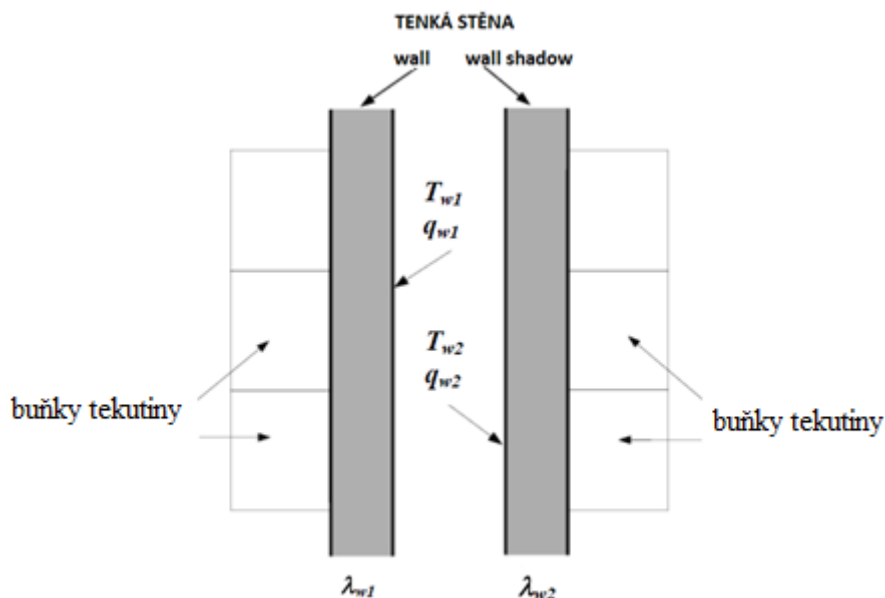
Obr. 6.2 Okrajové podmínky

| Označení | Typ okrajové podmínky |
|----------|-----------------------|
| vstup1 | mass flow inlet |
| výstup1 | pressure outlet |
| výstup2 | pressure outlet |
| vstup2 | mass flow inlet |
| výstup3 | pressure outlet |

Tab.6.2 Typy okrajových podmínek

Okrajové podmínky na stěně

Jelikož je stěna sušícího nástavce obtékána z obou stran vzduchem byla definována tzv. podmínka dvoustranné stěny obr.6.3.



Obr.6.3 Okrajové podmínky na tenké dvoustranné stěně

Pro tento typ okrajové podmínky lze definovat odlišné tepelné vlastnosti na každé zóně označené WALL a WALL SHADOW obr.6.3. V případě matematického modelování nástavce byla ve Fluentu použita funkce „coupled“, která propojila obě zóny. Žádné doplňující tepelné okrajové podmínky nebyly požadovány, protože byl přestup tepla řešen přímo z rovnice pro sousedící buňky. [2]

Fyzikální vlastnosti proudícího média a materiálu sušícího nástavce

Simulace byla prováděná pro různé vstupní teploty a průtoky. Proudění je uvažované jako neizotermní a proto fyzikální vlastností vzduchu byly definovány v závislosti na teplotě. Hustota byla definována pomocí stavové rovnice pro ideální plyn.

| Teplota [°C] | Měrná tepelná kapacita [kJ/kg/K] | Tepelná vodivost [W/m/K] | Kinematická viskozita $\cdot 10^{-6}$ [m ² /s] |
|--------------|----------------------------------|--------------------------|---|
| 20 | 1,005 | 2,59 | 15,06 |
| 40 | 1,005 | 2,76 | 16,96 |
| 60 | 1,005 | 2,90 | 18,97 |
| 80 | 1,009 | 3,05 | 21,09 |
| 100 | 1,009 | 3,21 | 23,13 |
| 120 | 1,009 | 3,34 | 25,45 |
| 140 | 1,013 | 3,49 | 27,80 |
| 160 | 1,017 | 3,64 | 30,09 |
| 180 | 1,022 | 3,78 | 32,49 |
| 200 | 1,026 | 3,93 | 34,85 |
| 250 | 1,038 | 4,27 | 40,61 |
| 300 | 1,047 | 4,60 | 48,33 |
| 350 | 1,059 | 4,91 | 55,46 |
| 400 | 1,068 | 5,21 | 63,09 |
| 500 | 1,093 | 5,74 | 79,38 |

Tab.6.3 Fyzikální vlastnosti vzduchu v závislosti na teplotě

Obdobně byl definován materiál sušícího nástavce, jímž byla nerezová ocel 19 152.

| Teplota [°C] | Hustota [kg/m ³] | Měrná tepelná kapacita [kJ/kg/K] | Tepelná vodivost [W/m/K] |
|--------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 0 | 7855 | 0,440 | 50,4 |
| 50 | 7842 | 0,469 | 49,8 |
| 100 | 7829 | 0,498 | 48,6 |
| 200 | 7800 | 0,544 | 45,6 |
| 300 | 7767 | 0,578 | 41,6 |
| 400 | 7731 | 0,624 | 38,3 |
| 500 | 7694 | 0,662 | 35,4 |
| 600 | 7655 | 0,779 | 33,0 |

Tab.6.4 Fyzikální vlastnosti nerezové oceli v závislosti na teplotě

6.3 Tvorba geometrie a výpočtové sítě

Základem matematického modelování je síť pokrytá výpočtová oblast. Výpočtová oblast se pomocí sítě rozdělí na sebe navazující 2D buňky ve dvojdimenzionálním prostoru nebo 3D ve třidimenzionálním prostoru. [2]

Charakteristika programového systému gambit

Program Gambit slouží k tvorbě a úpravě exportovaných 2D a 3D výpočetních oblastí ve kterých vygeneruje potřebnou síť. Ta je tvořena systémem nepřekrývajících se elementů, které podle tvaru můžeme rozdělit na:

- strukturovanou síť
- nestrukturovanou síť

Strukturovaná síť je ve dvourozměrné oblasti tvořena z obdélníků a křivočarých čtyřúhelníků a ve trojrozměrné oblasti z kvádrů a obecných šestistěnů. Výslednou síť nelze libovolně zhušťovat, jelikož hranice prvků musí sousedit s jedinou hranicí sousedního elementu.

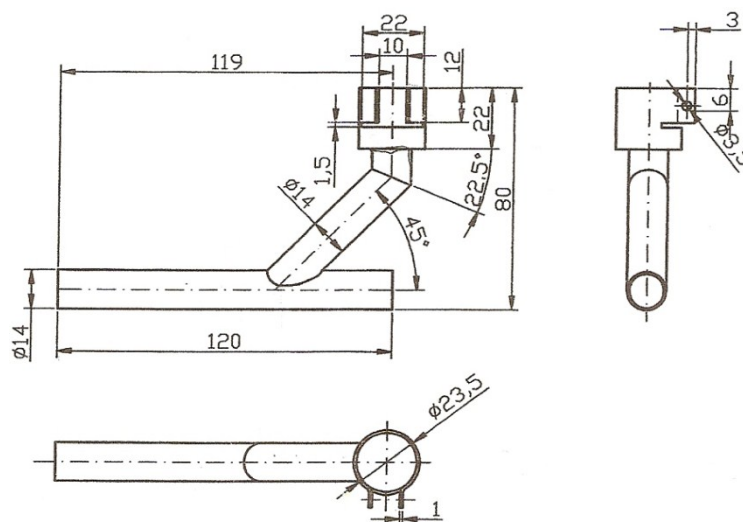
Nestrukturovaná síť je ve trojrozměrné oblasti tvořena z kvádrů, čtyřstěnů, prizmatických a pyramidových prvků. Výhodou těchto tvarů je možnost kombinace a tím získání optimálnější sítě.

Po vytvoření výpočetní sítě se definují okrajové podmínky:

- okrajové podmínky na hranici
- okrajové podmínky pro oblast proudění nebo pevné látky

Výpočetní síť 3D modelu stávajícího a konstrukčně upraveného sušícího nástavce a okolní oblasti

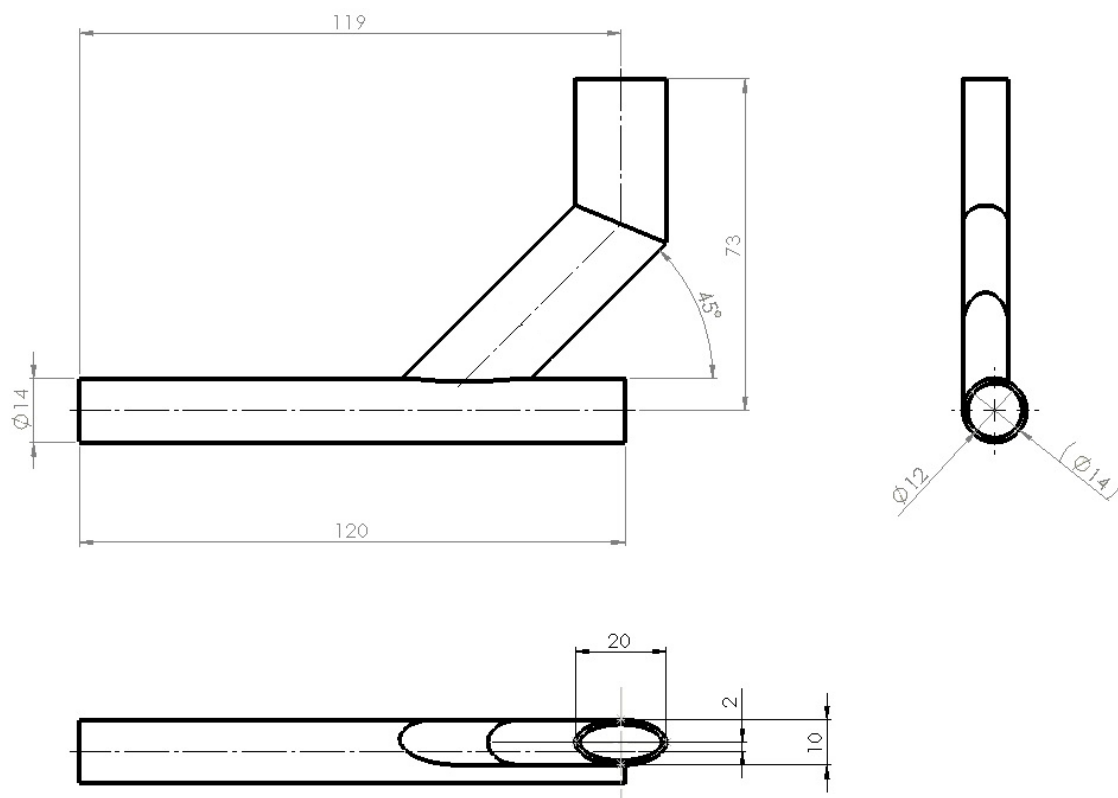
Na základě výkresové dokumentace (obr. 6.4) byl vytvořen model sušícího nástavce s okolní oblastí v 3D grafickém programu SolidWorks. Model byl převeden do formátu STEP, který je kompatibilní s programem Gambit 2.4.6. V Gambitu 2.4.6 byl model rozdělen na objem sušícího nástavce a na objem okolí. Dále byla vytvořena odpovídající výpočetní síť a byly definovány okrajové podmínky. Takto upravený model byl exportován ve formátu MESH do výpočetního programu Fluent 13.0.



Obr. 6.4 Rozměry stávajícího sušícího nástavce

Návrh konstrukční úpravy sušícího nástavce

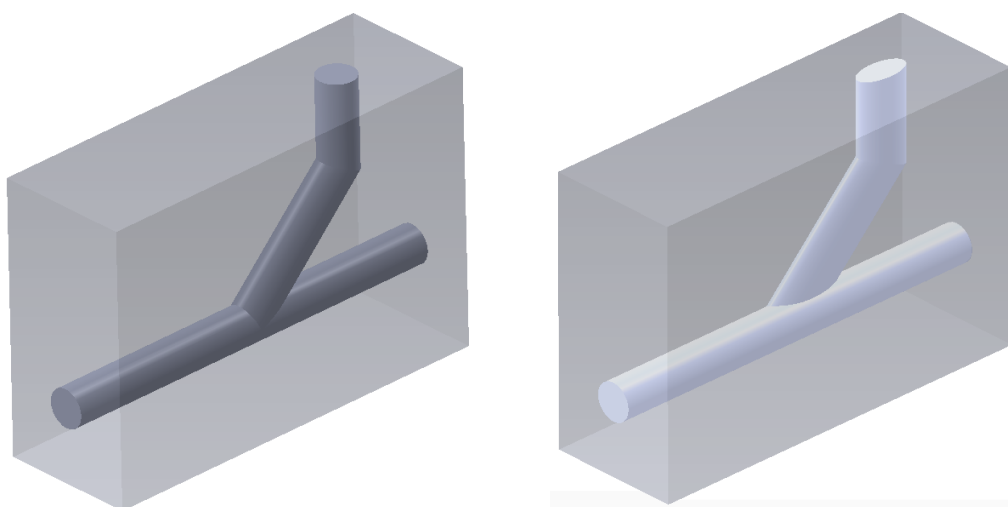
U stávajícího modelu se předpokládalo zavíření v oblasti napojení šikmé trubky do horizontální. Účelem konstrukční úpravy nástavce bylo dosažení plynulejšího proudění a tím efektivnějšího ohřevu vlákna. Úprava spočívala ve změně průřezu vertikální a šikmé trubky z kruhového na eliptický tvar při zachování velikosti průtočné plochy a vyoseném napojení do horizontální trubky (obr 6.5). U takto změněné konstrukce se odhadoval šroubovitý pohyb částic vzduchu.



Obr.6.5 Rozměry upravené konstrukce sušícího nástavce

Výsledné modely obou variant

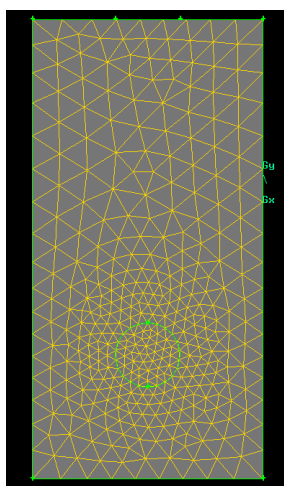
Na obrázku 6.6 jsou zobrazeny oba modely sušících nástavců vytvořených v programu SolidWorks. Z obrázku je patrné vyosené napojení trubky elipsovitého průřezu.



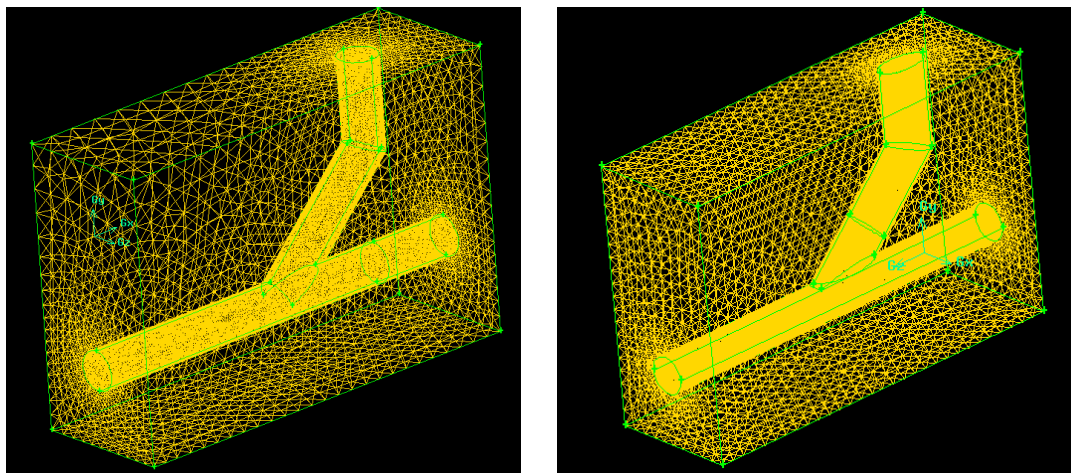
Obr.6.6 Model stávajícího a upraveného nástavce vytvořeného v programu SolidWorks

Vytvoření sítě

Výpočetní síť je rozdělena na oblast samotného sušícího nástavce a oblast okolí. Nejprve byla vytvořena výpočetní síť nástavce tetra/hybridními prvky. Poté byla pomocí nástroje „Size function“ vysítována oblast okolí, kdy se odvíjí velikost elementů od již utvořené sítě. Tím bylo dosaženo potřebného zhuštění kolem trubky pro zachycení přestupu tepla do okolí, jak je patrné z obrázku 6.7. Stejný postup byl aplikován pro vytvoření výpočetní oblasti nové geometrie nástavce.



Obr. 6.7 Zhuštění sítě kolem trubky nástavce



Obr. 6.8 Výpočetní síť stávající a nově vytvořené konstrukce sušícího nástavce

| | celkový počet buněk výpočetní sítě |
|----------------------|------------------------------------|
| stávající konstrukce | 186 604 |
| změněná konstrukce | 348 806 |

Tab. 6.5 Počet buněk ve výpočetní síti

7. APLIKACE MATEMATICKÉHO MODELU VE 3D

7.1 Studený model proudění vzduchu v sušícím nástavci

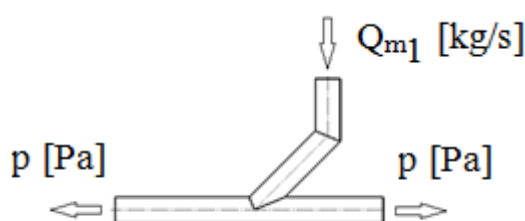
Účelem vytvoření této varianty bylo ověření správnosti nastavení matematického modelu, kdy byly porovnány výsledky experimentálního měření s výsledky matematického modelování. Zdrojem tlakového vzduchu byl centrální rozvod vzduchu. Byla provedena série měření, ze které byly vybrány tři hodnoty vstupního objemového průtoku [Nl/min]. Pomocí stavové rovnice (2.2) byl objemový průtok přepočten na hmotností. Tyto hodnoty sloužili jako okrajová vstupní podmínka.

Definování okrajových podmínek

- na vstupu byly nastaveny postupně tři hmotnostní průtoky Q_{m1} [kg/s] a tři vstupní teploty po přepočtu objemového průtoku Q_{N1} [Nl/min] viz. kapitola 2

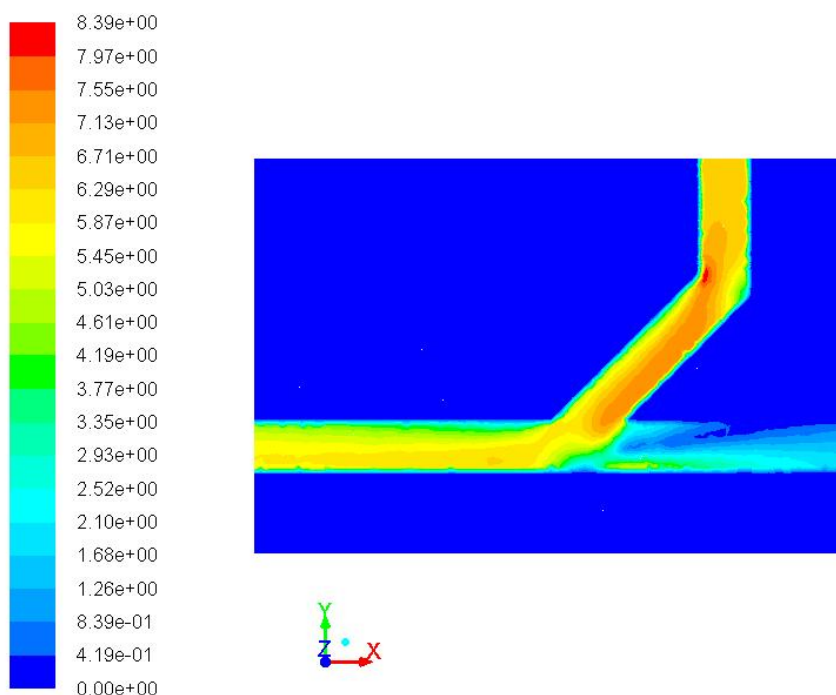
| Q_{N1} [Nl/min] | Q_{m1} [kg/s] |
|-------------------|-----------------|
| 60 | 0,001198942 |
| 80 | 0,001578328 |
| 100 | 0,001940183 |

- na obou výstupech byl nastaven přetlak $p = 0$ Pa pro všechny varianty



Obr. 7.1 Okrajové podmínky

Numerická simulace zkonvergovala po 37581 iteracích. Na obrázku 7.2 je pro názornost vyhodnocena rychlost v podélném řezu. Vzduch proudí nejrychleji v místě napojení vertikální trubky do šikmé. Z kontury rychlosti je dále patrné rozdělení průtoků do obou výstupů, kdy převážná část vzduchu proudí výstupem 1.



Obr. 7.2 Kontury velikosti rychlosti v sušicím nástavci [m/s]

Pomocí funkce „Report“ byly vyčísleny hodnoty hmotnostních průtoků Q_{m2} a v tabulce 7.1 byly porovnány s experimentálně získanými hodnotami. Z procentuálního srovnání vyplývá, že se vzrůstající velikostí hmotnostního průtoku, klesá rozdíl mezi matematickým model a provedeným experimentem.

| | experiment | matematický model | |
|-----------------|-----------------|-------------------|------------|
| Q_{m1} [kg/s] | Q_{N2} [kg/s] | Q_{N2} [kg/s] | rozdíl [%] |
| 0,001198942 | 0,000193 | 0,00022860392 | 16 |
| 0,001578328 | 0,000264 | 0,00028470525 | 8 |
| 0,001940183 | 0,000335 | 0,00034184999 | 2 |

Tab.7.1 Porovnání hodnot hmotnostního průtoku na „Výstupu 2“

7.2 Stávající konstrukce sušícího nástavce s přestupem tepla

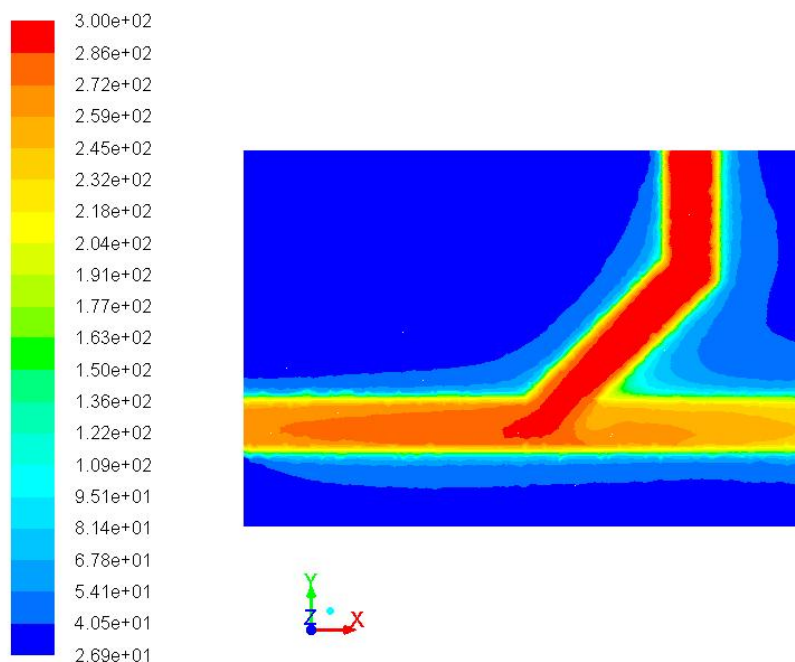
Definování okrajových podmínek

- vstupní okrajové podmínky sušícího nástavce byly definovány hmotnostním průtokem a teplotou (tab. 7.2) dle výpočtu jak je uveden v kap. 6.1.

| | Hmotnostní průtok [kg/s] | Teplota [°C] |
|-------------------|--------------------------|--------------|
| VARIANTA 1 | 0,001217473 | 300 |
| VARIANTA 2 | 0,001623297 | 300 |
| VARIANTA 3 | 0,002029121 | 300 |
| VARIANTA 4 | 0,001216383 | 400 |
| VARIANTA 5 | 0,001621844 | 400 |
| VARIANTA 6 | 0,002027305 | 400 |
| VARIANTA 7 | 0,001225437 | 500 |
| VARIANTA 8 | 0,001633916 | 500 |
| VARIANTA 9 | 0,002042395 | 500 |

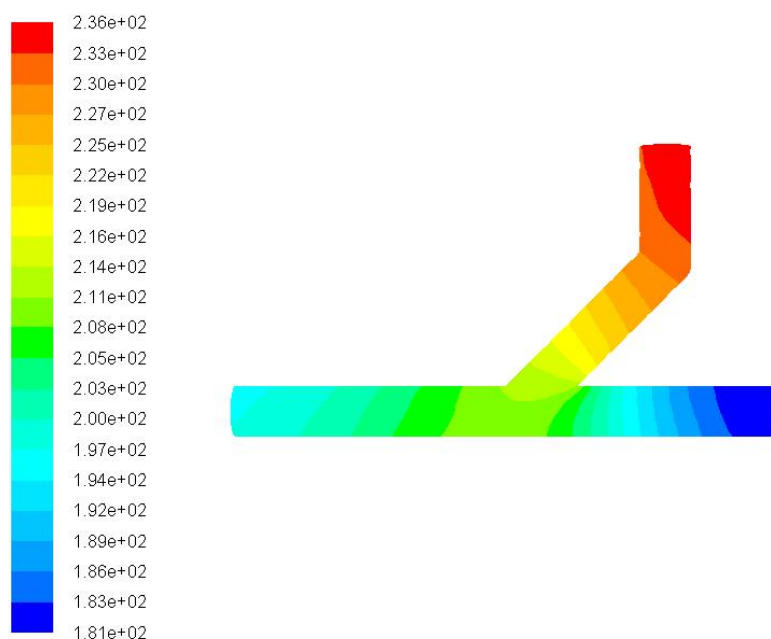
Tab. 7.2 Okrajové podmínky na vstupu

- výstup 1 ze sušícího nástavce byl definován hodnotou přetlaku $p=0\text{Pa}$
- výstup 2 ze sušícího nástavce byl definován hodnotou přetlaku $p=0\text{Pa}$
- podmínky na stěně byly definovány pomocí tenké dvoustranné stěny, kde byla nastavena funkce „coupled“ a bylo nutné definovat pouze materiál a tloušťkou stěny 1 mm
- vstup do okolního prostředí je definován nulovým hmotnostním průtokem a teplotou 20°C
- výstup z okolního prostředí je definován přetlakem $p=0\text{Pa}$



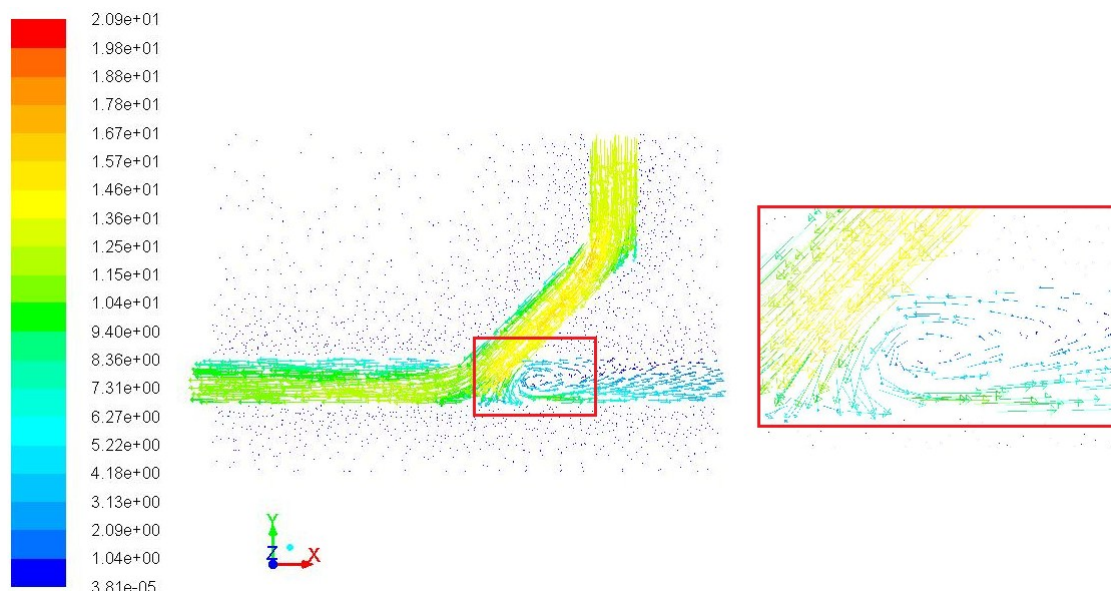
Obr.7.3 Zobrazení kontur statické teploty v podélném řezu pro VARIANTU 1 [°C]

Na obrázku 7.3 je zachyceno teplotní pole sušícího nástavce s okolní oblastí v podélném řezu pro vstupní hmotnostní průtok $0,001217473 \text{ kg/s}$ a teplotu 300°C . Teplota vzduchu v nástavci se pohybovala v rozmezí 180°C až 300°C . Nejvyšší teplota vzduchu byla na vstupu do sušícího nástavce a nejnižší na výstupu v těsné blízkosti stěny. Dále je z řezu patrný přestup tepla do okolní oblasti.



Obr.7.4 Zobrazení kontur teploty stěny na vnější straně pro VARIANTU 1 [°C]

Obrázek 7.4 znázorňuje rozložení teploty na vnější stěně sušícího nástavce při proudění horkého vzduchu o hmotnostním průtoku $0,001217473 \text{ kg/s}$ a teplotě 300°C . Nejvyšší teplotu má povrch stěny svislé trubky, kdy se teplota pohybuje kolem 230°C . Nejchladnější je povrch stěny cca 1 cm od výstupu 2, kdy má teplotu kolem 180°C .



Obr. 7.5 Zobrazení vektorů rychlosti v podélném řezu pro VARIANTU 1 [m/s]

Na obrázku 7.5 jsou vyhodnoceny vektory rychlosti v podélném řezu. Z orientace vektorů je patrné, že proudění ze vstupu 1 do výstupu 1 nemění směr. Část proudu naráží na spodní stěnu a vzniká zavíření těsně za napojením šikmé trubky do horizontální trubky, jak je patrné z detailu. Část průtoku proudí výstupem 2.

7.3 Změněná konstrukce sušícího nástavce s přestupem tepla

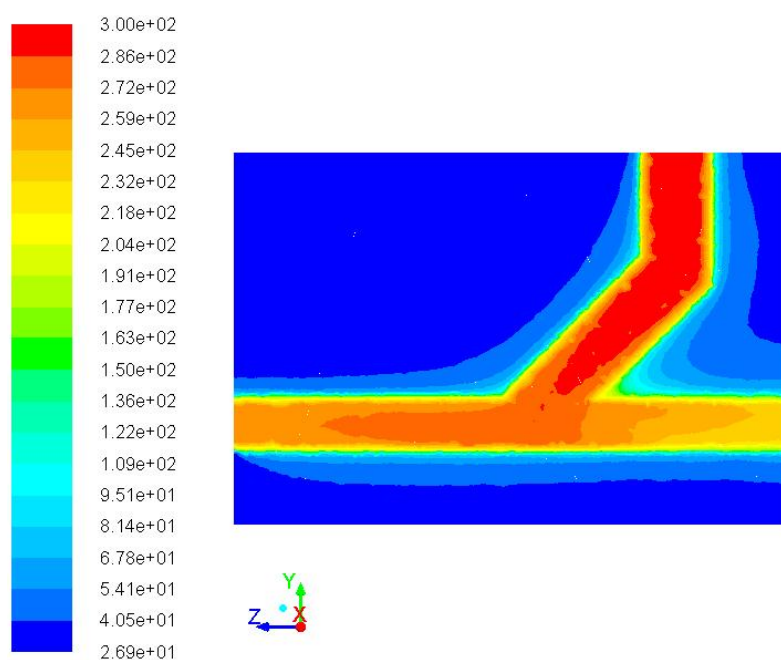
Definování okrajových podmínek

- vstup do upraveného sušícího nástavce byl definován hmotnostním průtokem a teplotou (tab. 7.3) dle výpočtu jak je uvedené v kap. 6.1.

| | Hmotnostní průtok [kg/s] | Teplota [°C] |
|-------------------|--------------------------|--------------|
| VARIANTA 1 | 0,001217473 | 300 |
| VARIANTA 2 | 0,001623297 | 300 |
| VARIANTA 3 | 0,002029121 | 300 |
| VARIANTA 4 | 0,001216383 | 400 |
| VARIANTA 5 | 0,001621844 | 400 |
| VARIANTA 6 | 0,002027305 | 400 |
| VARIANTA 7 | 0,001225437 | 500 |
| VARIANTA 8 | 0,001633916 | 500 |
| VARIANTA 9 | 0,002042395 | 500 |

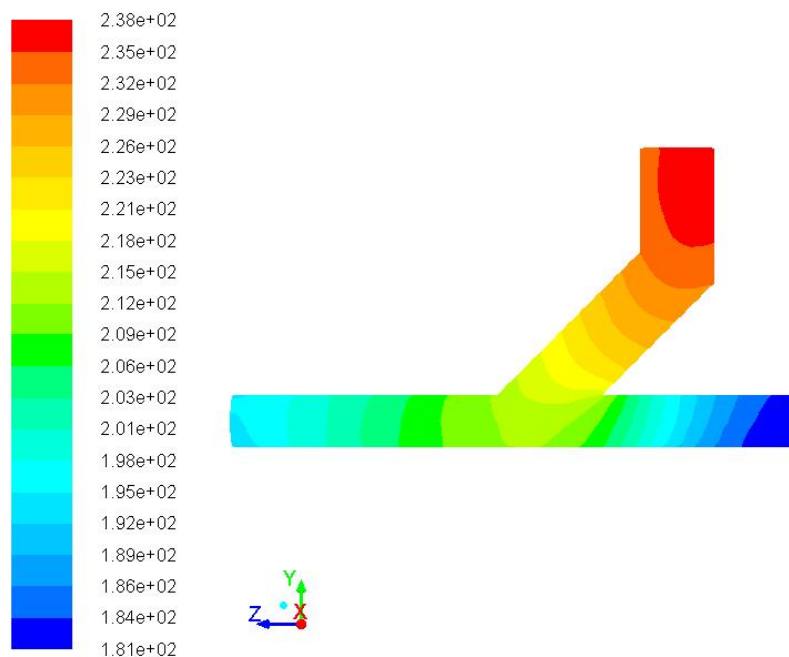
Tab.7.3 Okrajové podmínky na vstupu

- výstup 1 z upraveného sušicího nástavce byl definován hodnotou přetlaku $p=0\text{Pa}$
- výstup 2 z upraveného sušicího nástavce byl definován hodnotou přetlaku $p=0\text{Pa}$
- podmínky na stěně byly definovány pomocí tenké dvoustranné stěny, kde byla nastavena funkce „coupled“ a bylo nutné definovat pouze materiál a tloušťkou stěny 1 mm
- vstup do okolního prostředí je definován nulovým hmotnostním průtokem a teplotou 20°C
- výstup z okolního prostředí je definován přetlakem $p=0\text{Pa}$



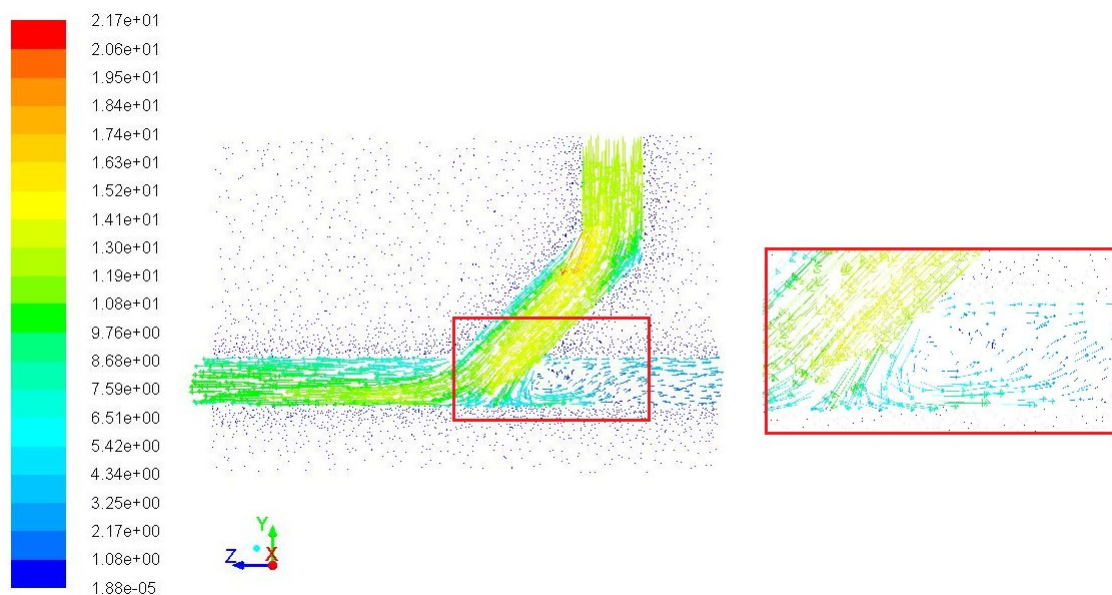
Obr.7.6 Zobrazení kontur statické teploty v podélném řezu pro VARIANTU 1 [$^\circ\text{C}$]

Na obrázku 7.6 jsou znázorněny výsledky rozložení teplot v podélném řezu konstrukčně upraveného sušícího nástavce. Vzduch vstupoval do nástavce o hmotnostním průtoku $0,001217473 \text{ kg/s}$ a teplotě 300°C . Teplota proudícího vzduchu se pohybovala v rozmezí přibližně 200°C až 300°C . Teplota okolního vzduchu těsně nad povrchem byla okolo 200°C a klesala až k teplotě 27°C .



Obr.7.7 Zobrazení kontur teploty stěny na vnější straně pro VARIANTU 1 [$^\circ\text{C}$]

Obrázek 7.7 uvádí rozložení teplot na vnějším povrchu konstrukčně upraveného nástavce pro vstupní okrajové podmínky odpovídající Variantě 1. Teploty na povrchu se pohybovaly od 181°C do 238°C .

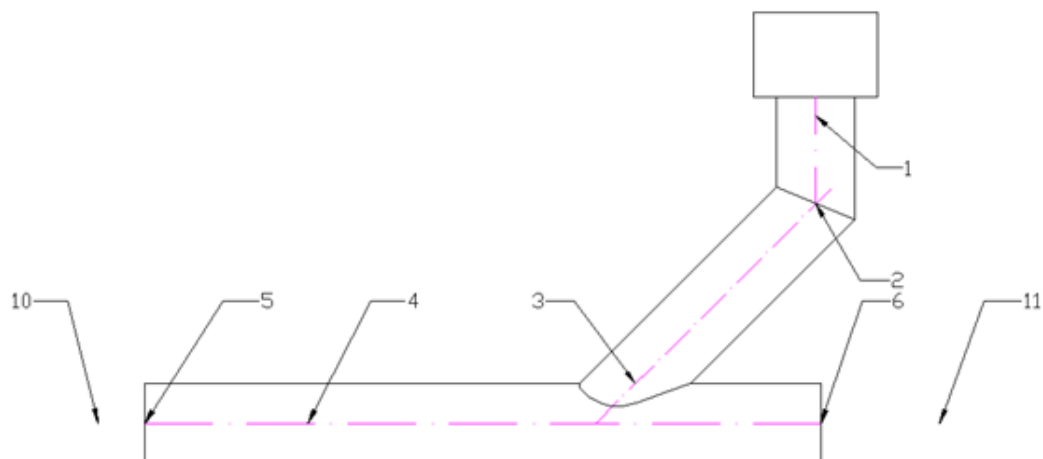


Obr.7.8 Zobrazení vektorů rychlosti v podélném řezu pro VARIANTU 1 [m/s]

Obrázek 7.8 znázorňuje vektory rychlosti pro upravenou konstrukci sušícího nástavce, které byly vyhodnoceny obdobně jako u stávající konstrukce.

7.4 Vyhodnocení matematického modelu na stávající a změněné konstrukci sušícího nástavce

Tato část diplomové práce se zabývá srovnáním naměřených hodnot na konstrukčně upraveném nástavci oproti stávajícímu. Pro porovnání efektivnosti úpravy sloužilo vyhodnocení základních proudových veličin. Na obrázku 7.9 jsou znázorněna místa na povrchu stěny sušícího nástavce, kde se vyhodnocovala teplota stěny a místa, kde byla vyhodnocena teplota vystupujícího horkého vzduchu.

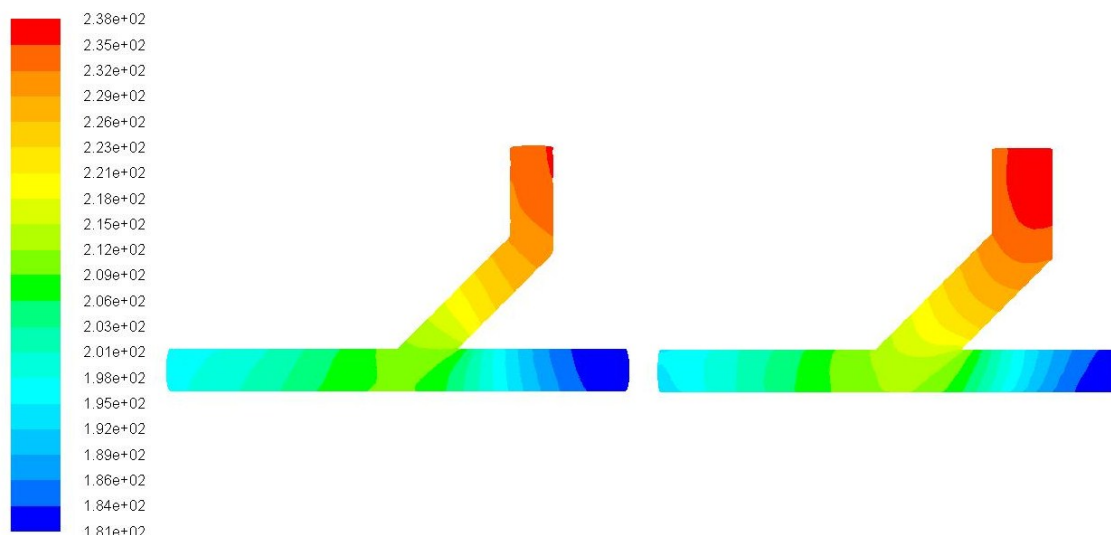


Obr.7.9 Označení míst, kde byla měřena teplota na povrchu stěny a teploty vzduchu na výstupech

V tab. 7.4 jsou uvedeny povrchové teploty stěny trubky a teploty v okolí výstupů vzduchu z nástavce. Teplota na jednotlivých místech povrchu stěny byla zjištěna odečtením z kontur teploty pro vnější stěnu. Teplota okolí byla vyhodnocena z podélného řezu v místě obou výstupů.

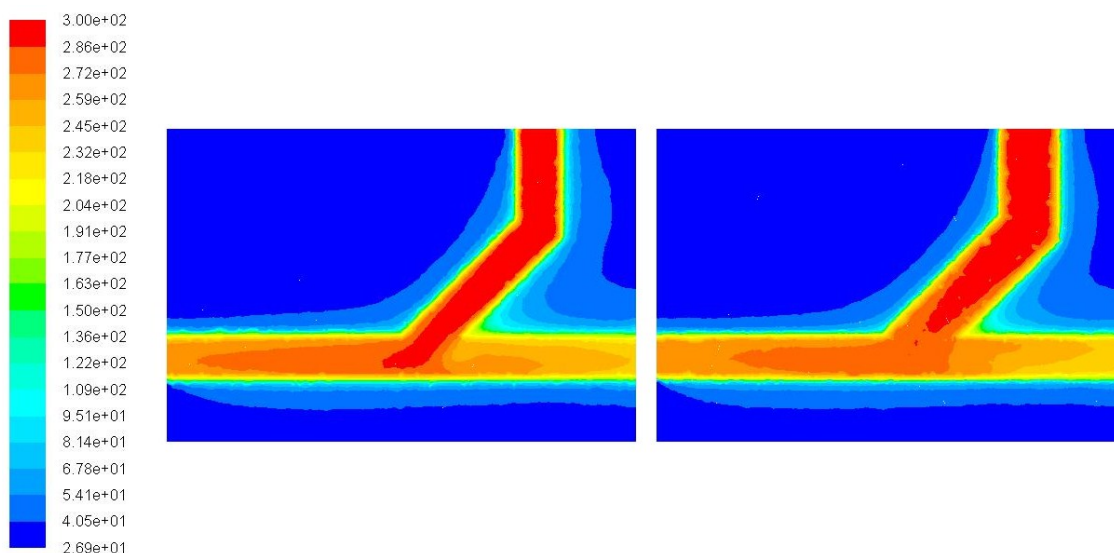
| | | Teplota na povrchu trubky [°C] | | | | | | Teplota okolí [°C] | |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 10 | 11 |
| Stávající konstrukce | VARIANTA 1 | 234 | 231 | 212 | 201 | 197 | 181 | 260 | 233 |
| | VARIANTA 2 | 236 | 234 | 218 | 210 | 204 | 188 | 270 | 244 |
| | VARIANTA 3 | 237 | 236 | 222 | 214 | 210 | 194 | 275 | 251 |
| | VARIANTA 4 | 318 | 311 | 284 | 270 | 261 | 238 | 344 | 306 |
| | VARIANTA 5 | 320 | 316 | 292 | 281 | 273 | 251 | 357 | 322 |
| | VARIANTA 6 | 322 | 319 | 299 | 288 | 280 | 253 | 365 | 332 |
| | VARIANTA 7 | 397 | 389 | 355 | 335 | 325 | 295 | 428 | 380 |
| | VARIANTA 8 | 399 | 394 | 364 | 349 | 339 | 310 | 445 | 400 |
| | VARIANTA 9 | 401 | 397 | 369 | 357 | 347 | 323 | 455 | 413 |
| Změněná konstrukce | VARIANTA 1 | 235 | 233 | 216 | 200 | 193 | 182 | 260 | 231 |
| | VARIANTA 2 | 239 | 236 | 224 | 209 | 204 | 191 | 270 | 243 |
| | VARIANTA 3 | 240 | 238 | 227 | 212 | 208 | 197 | 275 | 251 |
| | VARIANTA 4 | 322 | 316 | 289 | 265 | 260 | 239 | 344 | 304 |
| | VARIANTA 5 | 324 | 319 | 306 | 277 | 271 | 252 | 357 | 321 |
| | VARIANTA 6 | 326 | 322 | 304 | 288 | 279 | 263 | 366 | 332 |
| | VARIANTA 7 | 404 | 397 | 365 | 331 | 324 | 296 | 429 | 378 |
| | VARIANTA 8 | 407 | 403 | 373 | 348 | 338 | 314 | 446 | 399 |
| | VARIANTA 9 | 406 | 403 | 379 | 354 | 345 | 324 | 456 | 413 |

Tab.7.4 Tabulka vypočítaných hodnot povrchové teploty a teploty na výstupech



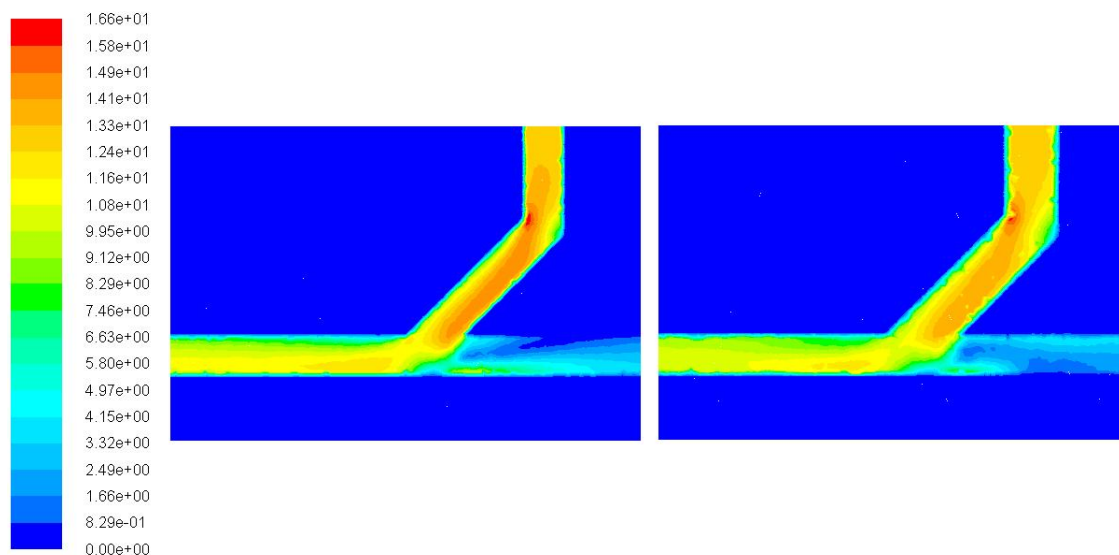
Obr.7.10 Porovnání kontur teplot stěn na vnější straně stávající a upravené geometrie při zadání stejných okrajových podmínek (Varianta 1) [°C]

Z tabulky 7.4 a z obrázku 7.10 je patrné, že při porovnání sobě odpovídajících si variant z hlediska stejných okrajových podmínek je teplota v měřených místech téměř totožná. Rozsah teploty stěny je od 181°C do 238°C, kdy nejvyšší teplota stěny je na vstupu do nástavce a směrem k výstupům se ochlazuje. Nižší teplota je na výstupu2 vlivem menšího průtoku. Teplota vystupujícího horkého vzduchu s konstrukčně upraveného nástavce se téměř neliší od hodnot pro stávající sušící nástavec.



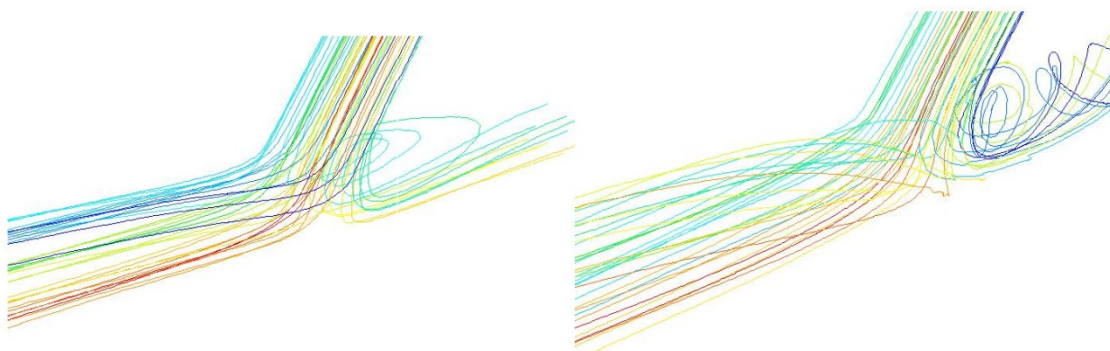
Obr.7.11 Porovnání kontur teplot v podélném řezu stávající a upravené geometrie při zadání stejných okrajových podmínek (Varianta 1) [°C]

Na obrázku 7.11 jsou znázorněny kontury teplot v podélném řezu pro stávající sušící nástavec a pro konstrukčně upravený. Pro oba modely byly zadány stejné okrajové podmínky. Teplotní pole je téměř totožné pro obě konstrukce. Nepatrně se liší kontury v oblasti napojení šikmé a horizontální trubky což bylo způsobeno porovnáváním řezu, který byl vytvořen ve stejné vzdálenosti pro obě geometrie.



Obr.7.12 Porovnání kontur rychlosti v podélném řezu stávající a upravené geometrie při zadání stejných okrajových podmínek (Varianta 1) [m/s]

Z obrázku 7.12 je patrné, jak velkou rychlostí proudí vzduch uvnitř sušícího nástavce. Rychlostní pole je pro obě konstrukce přibližně stejné, minimální změnu lze pozorovat na výstupu2.



Obr.7.13 Porovnání trajektorií částic vzduchu v detailním pohledu na napojení šikmé a vertikální trubky (vlevo-stávající konstrukce, vpravo-upravená konstrukce)

Obrázek 7.13 znázorňuje trajektorie částic při proudění sušícím nástavcem. Z detailu pro konstrukčně upravený nástavec je vidět počínající šroubovitý pohyb částic, který není plně vyvinut z důvodu krátké výstupní trubky.

Porovnání výstupních rychlostí pro stávající a změněnou konstrukci sušícího nástavce

V tabulce 7.5 jsou pomocí funkce „Surface integrals“ vyhodnoceny střední hodnoty výstupní rychlosti. Změnou konstrukce se docílilo snížení rychlosti na výstupu1 a naopak zvýšení rychlosti na výstupu 2.

| | vstup [m/s] | Stávající konstrukce | | Změněná konstrukce | |
|-------------------|----------------|----------------------|------------------|--------------------|------------------|
| | | výstup1 [m/s] | výstup2 [m/s] | výstup1 [m/s] | výstup2 [m/s] |
| VARIANTA 1 | 13,01 | 9,76 | 2,53 | 9,61 | 2,63 |
| VARIANTA 2 | 17,35 | 13,45 | 3,30 | 13,25 | 3,46 |
| VARIANTA 3 | 21,68 | 17,17 | 4,06 | 16,92 | 4,30 |
| VARIANTA 4 | 15,27 | 11,23 | 2,93 | 11,07 | 3,05 |
| VARIANTA 5 | 20,35 | 15,54 | 3,84 | 15,32 | 4,01 |
| VARIANTA 6 | 25,43 | 19,90 | 4,73 | 19,61 | 4,99 |
| VARIANTA 7 | 17,66 | 12,81 | 3,36 | 12,63 | 3,50 |
| VARIANTA 8 | 23,54 | 17,77 | 4,42 | 17,54 | 4,61 |
| VARIANTA 9 | 29,42 | 22,80 | 5,46 | 22,49 | 5,74 |

Tab.7.5 Porovnání rychlostí na výstupech

8. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou matematického modelování proudění horkého vzduchu v sušícím nástavci, jež slouží k sušení wolframového vlákna. Cílem diplomové práce bylo zhodnocení stávajícího proudění v sušícím nástavci a na základě získaných výsledků navrhnout vhodnou konstrukční úpravu pro efektivnější ohřev vlákna.

Nejprve byl v laboratoři katedry proveden experiment na zapůjčeném nástavci. Na vstup do nástavce byl přiveden studený vzduch z centrálního rozvodu a pomocí škrtícího ventil byl nastavován průtok, který byl odečítán z průtokoměru. Druhý průtokoměr byl připojen na výstupu2 a zobrazované hodnoty byly použity k porovnávání s tzv. studeným modelem.

Prvním krokem pro numerické modelování bylo vytvoření geometrie stávajícího sušícího nástavce. Podle výkresové dokumentace byl vytvořen v programu SolidWorks 3D model s nulovou tloušťkou stěny s ohledem na definování typu okrajové podmínky na stěně. Pro výpočet přestupu tepla ze stěny bylo nutné vytvořit kolem nástavce uzavřený objem představující okolní prostředí. Takto vytvořený model se exportoval ve formátu STEP do programu Gambit 2.4.6, ve kterém byla vytvořena vhodná síť s ohledem na modelování proudění s přestupem tepla. Na příslušných hranicích proudění byly definovány potřebné typy okrajových podmínek. Takto zpracovaný model se exportoval do výpočtového programu Fluent 13.0. Další krok spočíval v nadefinování odpovídajícího modelu. Bez přestupu tepla jako studený model a s přestupem tepla jako reálný model.

Studený model byl počítán jako izotermní turbulentní proudění. Výsledky z tohoto modelu byly porovnány s experimentem a sloužili jako ukazatel vhodnosti nastavení matematického modelu. Procentuální vyhodnocení obou získaných hodnot je v tabulce 7.1 a je z ní zřejmé, že s rostoucím průtokem Q_{N1} se matematický model blíží skutečnému.

Proudění v sušícím nástavci je definováno jako turbulentní s přestupem tepla. Ve Fluentu 13.0 byly nadefinovány okrajové podmínky pro stávající geometrii sušícího nástavce a pro geometrii okolního prostředí. Bylo provedeno devět numerických výpočtů, které se lišily teplotou a hmotnostním průtokem vstupujícího horkého vzduchu.

Na základě výsledků matematického modelování stávající geometrie sušícího nástavce byla navržena konstrukční úprava, ve které mělo být dosaženo efektivnějšího ohřevu wolframového vlákna. Změna konstrukce spočívala v excentrickém napojení šikmé trubky do vodorovné trubky. U takto změněné geometrie byl předpoklad vzniku šroubovitého pohybu vzduchu a tím plynulejší proudění. Na novou geometrii byl aplikován stejný matematický model jako na stávající konstrukci a byl učiněn výpočet pro shodné nastavení vstupních okrajových podmínek.

V sedmé kapitole je zhodnocena konstrukční úprava sušícího nástavce oproti stávající verzi. V tabulce 7.4 jsou porovnávány teploty vnější stěny na definovaných místech a teploty vzduchu na výstupech z nástavce. Porovnáním sobě odpovídajících si variant nastavení vstupních okrajových podmínek byl zjištěn zanedbatelný rozdíl jak

mezi teplotami na povrchu nástavce tak i teplotami vzduchu na výstupech. Také z kontur teplotních polí vyhodnocovaných v podélném řezu je vidět jen minimální odchylka. Podstatnější rozdíl je vidět na obrázku 7.13, na němž jsou zobrazeny trajektorie pohybu částic vzduchu při proudění sušícím nástavce. U změněné konstrukce je vidět předpokládaný spirálovitý pohyb.

Navržená geometrie sušícího nástavce má oproti stávající variantě jen minimálně rozdílné teplotní pole, kdy se teploty liší jen v řádu stupňů. Efektivnější ohřevu by se zřejmě docílilo plynulejším napojením jednotlivých částí trubek, tak aby snížili ztráty.

9. LITERATURA

[1] JANALÍK, J.; ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin*. Ostrava, 2002, 128 s.

ISBN 80-248-0038-1

[2] KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění- Fluent 1*, VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s. <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.

[3] ENENKL, V.; CHRASTINA, J.: *Termomechanika*. Nakladatelství VUT Brno, 243s.

[4] BOJKO, M.: *Návody do cvičení „Modelování proudění“- FLUENT*. VŠB-TU Ostrava, 2008, 141 s. ISBN 978-80-248-1909-9

[5] MACHÁČKOVÁ, A.; KOCICH, R.: *Sdílení tepla a proudění* Ostrava, 2010, 180s. dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf

[6] <http://www.leister.com/de/index.html>

[7] FLUENT: *Fluent 13.0 - Theory guide* Ansys, Inc. 2010. VŠB-TU Ostrava. dostupný z: <<http://spc.vsb.cz>>.

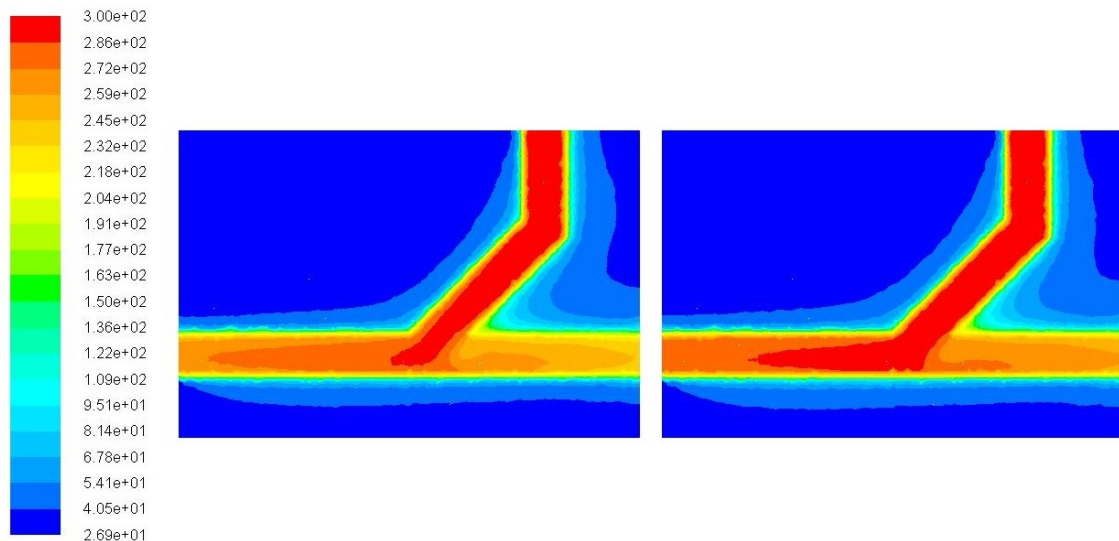
[8] JÍLEK, M.: *Thermomechanics*, Nakladatelství ČVUT, 2006, 176 s. ISBN 80-01-03452-6.

[9] NOŽIČKA, J.: *Základy termomechaniky*, Nakladatelství ČVUT, 2001, 187 s. ISBN 80-01-02409-1.

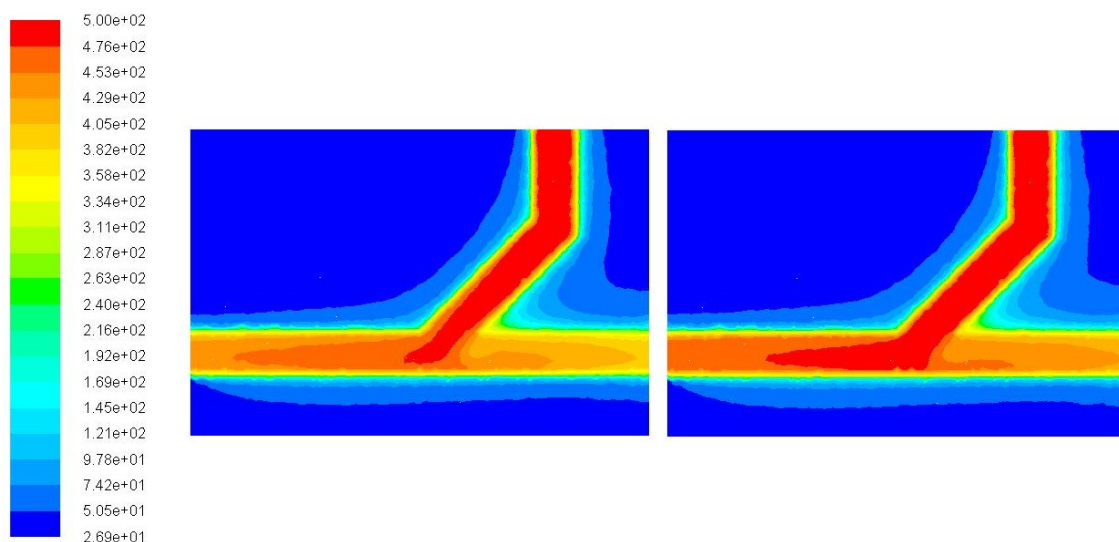
[10] <http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/enz%20teplo%20skripta.pdf>

10. PŘÍLOHY

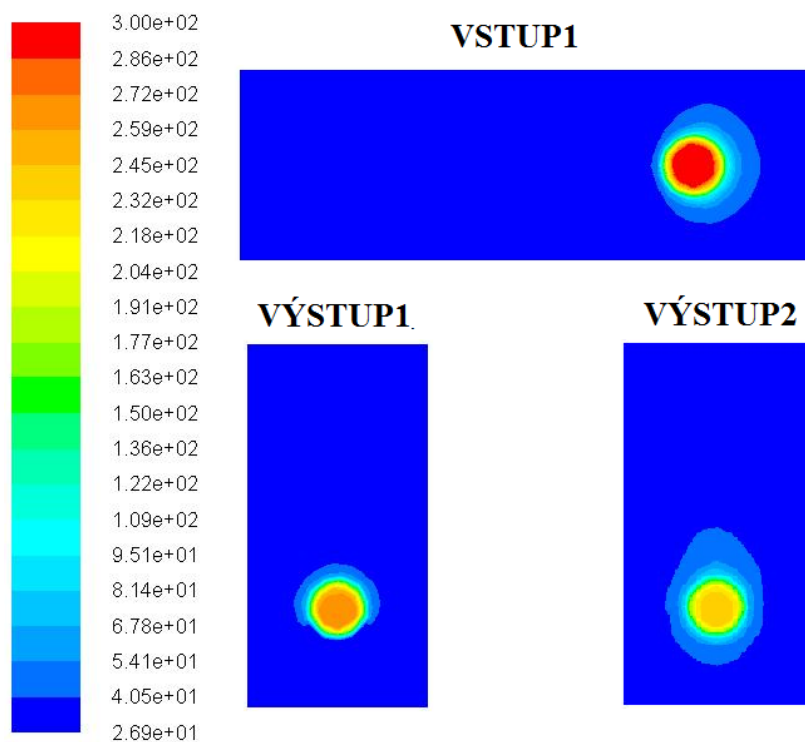
10.1 Příloha ke kapitole 7.2



Obr.10.1 Porovnání teplotních polí [°C] dvou modelů stávající geometrie pro stejnou vstupní teplotu 300 [°C] a různý vstupní průtok 60 a 100 [kg/s]

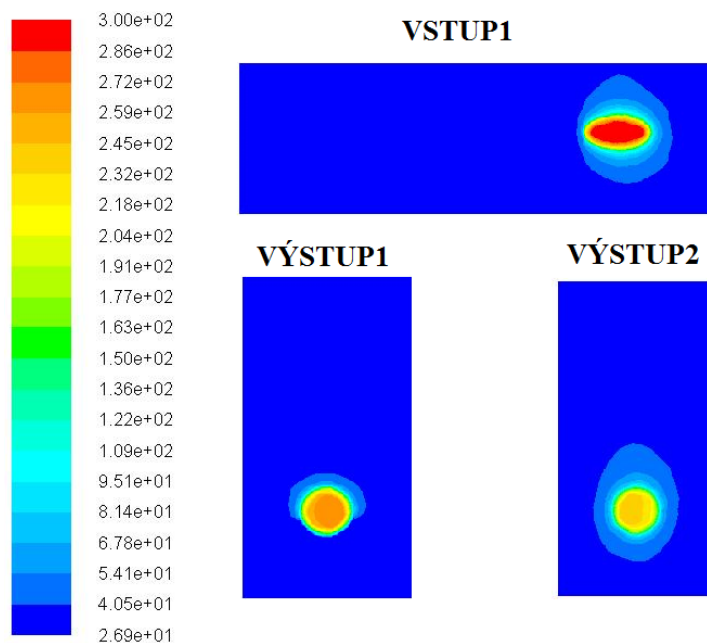


Obr.10.2 Porovnání teplotních polí [°C] dvou modelů stávající geometrie pro stejnou vstupní teplotu 500 [°C] a různý vstupní průtok 60 a 100 [kg/s]



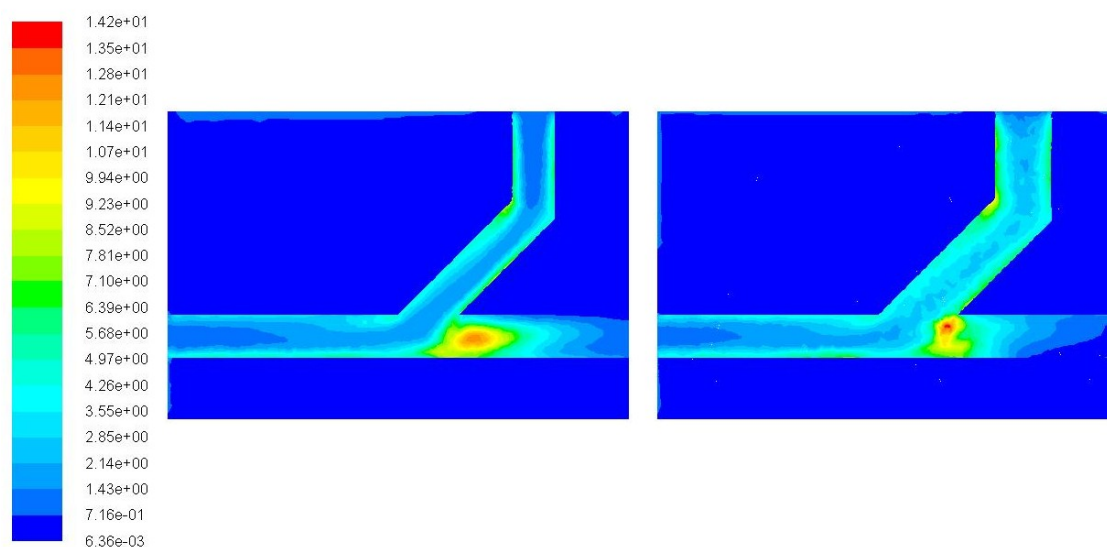
Obr.10.3 Zobrazení teplotních polí na vstup1, výstup1 a výstup2 pro Variantu1 [$^{\circ}\text{C}$]

10.1 Příloha ke kapitole 7.3



Obr.10.4 Zobrazení teplotních polí na vstup1, výstup1 a výstup2 pro Variantu1 [$^{\circ}\text{C}$]

10.2 Příloha ke kapitole 7.4



Obr.10.5 Porovnání kontur turbulentní kinetické energie v podélném řezu stávající a upravené geometrie při zadání stejných okrajových podmínek (Varianta 7) [m^2/s^2]